Praktikumsanleitung

Bodenkunde und Agrikulturchemie

für die Studierenden des Studiengangs Agrarwirtschaft an der Fachhochschule Bingen

von Prof. Dr. Th. Appel unter Mitarbeit von Frau A. Walk

Stand: 6.10.2015

1 Vorbemerkungen

1.1 Lernziele

Das Praktikum soll die Teilnehmenden (TN) mit wichtigen bodenkundlichen Untersuchungsmethoden vertraut machen, die verwendet werden, um physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften zu untersuchen. Der Schwerpunkt liegt bei Methoden, die im Labor durchgeführt werden (Laborpraktikum). Grundlegende theoretische Kenntnisse der Bodenkunde werden dabei vorausgesetzt. Folgende Lernziele sollen am Ende des Praktikums erreicht sein:

- Die TN haben die prinzipielle Vorgehensweise der Untersuchungsmethoden begriffen und können die Grundzüge der Verfahren einem Laien mit eigenen Worten erklären.
- Die TN kennen die erforderliche Laborausrüstung und können diese nach Anleitung bedienen.
- Die TN sind in der Lage, die gewonnenen Rohdaten in einem Untersuchungsprotokoll zu erfassen, auszuwerten und darzustellen.
- Die TN kennen die wesentlichen Fehlerquellen der jeweiligen Untersuchungsmethoden. Sie können mögliche Ursachen für mangelnde Präzision, Validität und Repräsentanz der Ergebnisse benennen und den Einfluß methodischer Modifikationen darauf prinzipiell einschätzen.
- Die TN können die erzielten Untersuchungsergebnisse in Hinblick auf wichtige Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen interpretieren.

1.2 Hinweise zur Laborbenutzung

1.2.1 Vorbereitung

- Auffrischen der theoretischen Grundlagen
- Vorbereiten der für die Verfahren notwendigen Geräte, Hilfsmittel und Reagenzien in Absprache mit Frau Walk.
- Planung des Arbeitsablaufes unter Beachtung zeitlicher und sicherheitstechnischer Gesichtspunkte

1.2.2 Protokollieren (vollständig, übersichtlich)

- Ablauf, Zwischenergebnisse, Besonderheiten, Bemerkungen

1.2.3 Sicheres Arbeiten

- Tragen von Schutzkleidung (Kittel, Schutzbrille, Handschuhe usw.).
- Gefährlichen Reaktionen und Anwendungen verhindern, Sicherheitshinweise beachten.
- Behältnisse mit Lösungen und Reagenzien deutlich beschriften.
- Essen, Trinken und Rauchen ist in den Laborräumen nicht gestattet.

1.2.4 Sauberes Arbeiten

- Labortische sauber halten.
- Geräte, Reagenzien, Hilfsmittel und Proben übersichtlich anordnen.
- Proben eindeutig und deutlich lesbar beschriften.
- Reinigen von Gefäßen und Hilfsmitteln nach deren Verwendung.
- Entsorgen von Analysenabfällen nach Anweisung.

Grundsätzlich ist im Laborbereich den Anweisungen des Laborpersonals zu folgen.

1.3 Zeitplan

Das Praktikum findet in fünf Gruppen statt, und zwar je Gruppe an 4 Nachmittagen (14 - 19 Uhr):

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5
1. Praktikums-woche	Mo. 5.10. Do. 8.10.	Mo. 12.10. Do. 15.10.	Mo. 19.10. Do. 22.10.	Mo. 16.11. Do. 19.11.	Mo. 24.11. Do. 26.11.
2. Praktikums-woche	Mo. 26.10. Do. 29.10.	Mo. 2.11. Do. 5.11.	Mo. 9.11. Do. 12.11.	Mo. 7.12. Do. 10.12.	Mo. 14.12. Do. 17.12.

Arbeiten vor dem ersten Praktikumstermin

Die von den Teilnehmern mitgebrachten feldfeuchten Bodenproben sind durch ein Sieb mit 2 mm Maschenweite zu passieren, damit sie im Praktikum untersucht werden können. Je nach Tonanteil und Bodenfeuchte dauert das ca. 30 min bis 1 h.

Arbeiten in der 1. Praktikumswoche:

Von studentischen Hilfskräften werden in der Woche vor dem Praktikum zunächst auf einem Feld in der Nähe der Fachhochschule ungestörte Bodenproben (Stechringproben) entnommen. Diese Proben dann im Labor auf ihre gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) und die Größenverteilung der Poren (pF-Kurve) analysiert. Die Entnahme von Stechringproben wird später bei den Übungen am Bodenprofil gezeigt.

Außerdem gibt es noch Bodenproben, die von den Teilnehmern mitgebracht werden. Die Bodenart dieser Proben wird mit zwei Methoden bestimmt: a) Fingerprobe, b) Körnungsanalyse. Der Feinboden (< 2 mm) der mitgebrachten Böden wird bei 40 °C getrocknet und am zweiten Praktikumstag der pH-Wert des Bodens gemessen. Zur Bestimmung des Humusgehalts wird 1 g in Stahltiegel eingewogen. Die Elementaranalyse wird dann von Frau Walk, der Laborassistentin durchgeführt.

Die von den Teilnehmern mitgebrachten Bodenproben werden für einen Keimpflanzenversuch im Gewächshaus (Neubauerversuch) verwendet. Dieser Versuch wird am zweiten Tag der ersten Praktikumswoche angesetzt. Er steht dann 2,5 Wochen im Gewächshaus und wird in der zweiten Praktikumswoche geerntet und analysiert. Mit diesem Versuch wird untersucht, inwieweit die mit der CAL-Methode untersuchten Nährstoffe für die Keimpflanzen verfügbar sind.

Bestimmungs-stücke	Montag		Donnerstag	
	14 bis 16 Uhr	16 bis 19 Uhr	14 bis 16 Uhr	16 bis 19 Uhr
pF-Kurve	Wiegen, dann für kf-Kurve vorbereiten	Drucktopf: 300 mbar und 15 bar		Rückwaage, dann Trocknen bei 105 °C
kf-Bestimmung	Stechringe in Permeameter einsetzen	kf-Bestimmung kf-Werte auswerten		
Wassergehalt	Einwaage, Trocknen 105°C			Rückwaage, Auswertung
Körnungs-analyse	Einwaage, + Na-Pyrophosphat	Dispergieren, 6 h Schütteln	Sieben, Sedimentieren	Ton abnehmen, Trocknen 105 °C
Humusgehalt			Einwiegen ca. 1 g	
Fingerprobe		Fingerprobe		
pH-Wert			Einwiegen 10 g +25 ml	Messen: Glaselektrode
NH_4^+ in Gülle		Quantofix		
Neubauer-Versuch				Ansetzen Neubauerversuch

Arbeiten zwischen den beiden Praktikumswochen

Die Pflanzen im Neubauerversuch müssen täglich mit entionisiertem Wasser gewässert werden. Hierfür wird gemeinsam ein Gießplan aufgestellt.

Arbeiten in der 2. Praktikumswoche:
In der zweiten Praktikumswoche werden die Proben der Teilnehmer weiter untersucht, und zwar die pflanzenverfügbaren Nährstoffe mittels Bodenuntersuchung (CAL-Methode) und Pflanzenanalyse (Neubauer-Versuch) sowie der Carbonatgehalt der mitgebrachten Böden. Das getrocknete Erntegut des Neubauerversuchs muss vor der Analyse pulverisiert werden. Diese Arbeit wird von freiwilligen Helfern am Mittwoch - also zwischen den beiden Praktikumsterminen der zweiten Praktikumswoche - erledigt.

Bestimmungs-stücke	Montag		Dienstag oder Mittwoch	Donnerstag	
	14 bis 16 Uhr	16 bis 19 Uhr		14 bis 16 Uhr	16 bis 19 Uhr
CAL-P	Einwaage, CAL-Lösung, Schütteln	Filtrieren Anfärben ⇒ Photometer Verdünnen ⇒ AAS			
CAL-K					
Carbonat	Methode nach Scheibler				
Körnungs-analyse	Rückwaagen Auswertung				
Neubauer-Versuch		Ernte der Pflanzen und Trocknen bei 105 °C	Mahlen der Proben (Frau Walk mit Hiwis)	Druckaufschluss, Abkühlen lassen, Zentrifugieren oder Filtrieren	Anfärben ⇒ Photometrie Verdünnen ⇒ AAS
pF-Kurve				Rückwaage nach 105 °C	Auswertung

Protokolle:
Die Messergebnisse werden während des Praktikums von den Teilnehmern protokolliert. Das Protokoll enthält auch die Rechenwege, die Ergebnisse und deren Interpretation. Das von den Teilnehmern jeweils angefertigte Protokoll ist Voraussetzung für einen erfolgreichen Abschluss des Praktikums.
Abgabetermine:
Gruppe 1: Dienstag, 3.11. Bodenkunde-Vorlesung
Gruppe 2: Dienstag, 10.11. Bodenkunde-Vorlesung
Gruppe 3: Dienstag, 17.11. Bodenkunde-Vorlesung
Gruppe 4: Dienstag, 15.12. Bodenkunde-Vorlesung
Gruppe 5: Dienstag, 5.01. Bodenkunde-Vorlesung

Die Protokolle können höchstens einmal nachgebessert werden. Nachgebesserte Protokolle müssen innerhalb einer Woche wieder abgegeben werden.

1.4 Probenahme und Probenverwendung

1.4.1 **Stechringproben** zur Bestimmung des Porenvolumens und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f-Wert)

Das Porenvolumen, die pF-Kurve und der k_f-Wert müssen an Böden in ihrer natürlichen Lagerung untersucht werden. Mit Hilfe von Stechringen werden hierfür so genannte „ungestörte“ Proben gewonnen. Die Probennahme ist aufwendig, weil eine Grube gegraben werden muss. Ungestörte Proben werden deshalb selten flächenrepräsentativ entnommen, sondern meist nur an einem oder wenigen Standorten innerhalb der zu untersuchenden Fläche. Sie sind deshalb nicht flächenrepräsentativ. Für das Praktikum benötigt jeder Teilnehmer eine Stechringprobe, die vor dem Praktikum von

studentischen Hilfskräften auf einem Feld in der Nähe des Campusgeländes der FH aus der Unterkrume aus 20 bis 25 cm Tiefe entnommen wurden. Die Vorgehensweise bei der Stechring-probenahme lernen die Praktikumsteilnehmer später bei Übungen an einem Bodenprofil.

1.4.2 „**Gestörte“ Proben** für die Untersuchung der Textur, des pH-Wertes und weiterer boden-chemischer Eigenschaften (flächenrepräsentativ, siehe Anleitung unten)

Wesentlich einfacher zu entnehmen sind (in der Lagerung) gestörte Bodenproben. Hierzu werden Rillenbohrer verwendet. Die Teilnehmer, die im Praktikum eigene Bodenproben untersuchen, entnehmen diese am besten flächenrepräsentativ, wie unten dargestellt. Für die Laboruntersuchungen wird nur der Feinboden (< 2 mm) verwendet. Hierzu wird ein Aliquot von ca. 300 g des Bodens im Labor durch ein 2 mm Sieb passiert.

2 Entnahme repräsentativer Bodenproben im Freiland

2.1 *Einleitung*

Im Labor gilt der Spruch: Die Analyse kann niemals besser sein als die Probe. Damit ist gemeint, dass die Analyse im Labor noch so genau sein kann, wenn die Probe nicht repräsentativ für den untersuchten Gegenstand ist, dann wird das Ergebnis trotz richtiger Messung falsch sein (d.h. ausreichende Präzision, aber mangelnde Validität der Messsung). Das Entnehmen einer repräsentativen Probe ist deshalb eine Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse. Um Bewirtschaftungsmaßnahmen steuern zu können oder um den diffusen Eintrag von Schadstoffen abschätzen zu können, ist es erforderlich, eine bestimmte Fläche (z.B. einen Ackerschlag) repräsentativ zu beproben. Je heterogener die Fläche, umso schwieriger ist das. Schließlich wird im Labor nur etwa ein dreißig-millionstel Teil des Bodens der zu untersuchenden Fläche analysiert. Selbst wenn zunächst Boden entnommen wurde, der für die Fläche repräsentativ ist, so kann die Probe später durch unsachgemäße Behandlung bis zur Analyse verändert worden sein (z.B. falsche Lagerung, Entmischung der Partikelgrößen). Deshalb ist grundsätzlich auf zweierlei zu achten:

- Repräsentative Entnahme
- Sachgemäßes Transportieren, Lagern und Aufteilen.

2.2 *Prinzipielle Vorgehensweise*

Zahlreiche Bohrkerne werden über die Fläche verteilt entnommen. Faustzahl: 8 bis 15 je Standort[1]. Die Bohrkerne werden nach Schichten getrennt zu einer Mischprobe vereinigt, homogenisiert und ein Aliquot entnommen, das bis zur Analyse ggf. gekühlt aufbewahrt wird. Bei bindigen Böden kann es für das Homogenisieren erforderlich sein, den Boden vorher zu zerkleinern (z.B. passieren durch ein Sieb mit ca. 5 mm Maschenweite). Bei der Beprobung auf Nitrat werden üblicherweise die Schichten 0-30, 30-60 und 60-90 cm mit dem Bohrstock getrennt beprobt. Für die Analyse der Grundnährstoffe wird nur die Ackerkrume, meist 0-30 cm, oder beim Grünland der humose Oberboden (0-10 cm) verwendet.

2.3 *Durchführung (Quelle: Nitrat-Informations-Dienst, LUFA Augustenberg)*

2.3.1 Erste Schicht beproben

- Einstichstelle von Pflanzenteilen freimachen und ggf. festtreten (zur Verteilung der Einstiche siehe Abbildung unten).
- Bohrstock vorsichtig nur 30 cm tief einschlagen (auf Sandböden in einem Zug 90 cm tief).
- Bohrkern durch drehen des Bohrstocks (eine Drehung) abtrennen und vorsichtig ausheben.
- Bodenmaterial in einen Eimer auskratzen (Bohrstock nicht auf dem Eimerboden aufsetzen).

2.3.2 Zweite (und dritte) Schicht beproben

- Bohrstock (möglichst mit geringerem ∅) erneut in das Bohrloch stecken und auf die gewünschte Beprobungstiefe einschlagen (60 oder 90 cm), ggf. Bohrstock zwischendurch abdrehen.
- **Achtung!!** Bei steinigem Untergrund rechtzeitig mit dem Einschlagen aufhören!
- Bohrstock abdrehen (eine Drehung) und vorsichtig ausheben.
- Bodenschichten mit je 30 cm in zugehörige Eimer auskratzen.
- Beachte: Aus der Krumenschicht nachgefallene Bodenteile sind zu entfernen.

2.3.3 Mischprobe herstellen und Aliquot entnehmen

- Der oben beschriebenen Vorgang wird mindestens 8- bis 15mal wiederholt und die Bohrkerne jeweils getrennt für die Schichten in drei Eimern gesammelt.
- Bohrkerne zerkleinern, z.B. indem sie durch ein 5 mm Sieb passiert werden.
- Mischen der zerkleinerten Probe und Entnahme eines Aliquots mit einer kleinen Schaufel

[1] Der VDLUFA empfiehlt in der Neuauflage des Methodenbuches für physikalische Untersuchungen 25 Einstiche

- Die aliqote Probe wird in ein nicht saugfähiges Behältnis gegeben (z.B. Gefrierbeutel) und bis



zur Einwaage bzw. Analyse auf Nitrat und austauschbares Ammonium gekühlt gelagert.

3 Porenvolumen und dessen Größenverteilung (pF-Kurve)

3.1 Einleitung

Der Porenraum des Bodens ist teils mit Wasser und teils mit Luft gefüllt. Der Porenraum ist wichtig für alle Bewegungsvorgänge von Luft, Wasser und gelösten Stoffen. Die Wurzeln wachsen im Porenraum und auch die Bodenorganismen leben dort. Das Volumen des Porenraumes (PV) ist deshalb eine wichtige Größe. Die Bestimmung kann durch direkte Messung (Luftpyknometrie + Wassergehaltbestimmung) oder indirekt durch Berechnung aus Dichtewerten erfolgen. Die zweitgenannte Methode wird im Praktikum angewandt.
Für viele Bodenfunktionen sind neben der Größe des Porenraumes insgesamt auch die Form und die Verteilung (Diversität) der Poren entscheidend. Das hängt vor allem mit dem Verhalten des Wassers im Boden zusammen. In relativ großen Poren wird das Wasser kaum festgehalten. Sie werden deshalb schnell durch Sickerung entleert und sind deshalb meist mit Luft gefüllt. Je enger die Poren sind, umso stärker wird das Wasser in den Poren festgehalten. In sehr kleinen Poren wird das Wasser extrem stark gebunden und kann nicht von den Pflanzen aufgenommen. Weil die Porengrößenverteilung vor allem für den Wasser- und Lufthaushalt wichtig ist, wird in der Praxis nicht die Form und die Größe der Bodenporen gemessen (unter dem Mikroskop), sondern deren Einfluß auf das Wasserbindungsvermögen. Zur Veranschaulichung können aus dem Wasserbindungsvermögen dann so genannte Äquivalentporendurchmesser berechnet werden. Hierunter versteht man den Durchmesser einer gleichmäßig geformten zylindrischen Glasröhre (Kapillare), welche die entsprechende (d.h. äquivalente) Wasserhaltefähigkeit aufweist. Der Druck, mit der Wasser in den Poren festgehalten wird, bezeichnet man als Wasserspannung. Die pF-Kurve stellt die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt dar[2)]. Der Zusammenhang kann *in situ* nur mit großem Aufwand aufgezeichnet werden. Im Labor ist im mittleren Bereich zwischen pF 1,2 und pF 4,3 vor allem die Überdruckmethode gebräuchlich.
Das Prinzip der Methoden besteht darin, die Kapillarmenisken und die Wasserfilme einem Druck auszusetzen und dadurch all das Wasser aus der Bodenprobe zu treiben, dessen Bindungsfestigkeit geringer ist, als dem angelegten Überdruck entspricht. Folgende Einteilung in Porengrößenbereiche ist üblich:

Porengrößenbereiche			Äquivalent-durchmesser	Saugspannung bei Entwässerung			
			µm	cm WS	bar	hPa	pF
Grob-poren	große	schnell dränend	> 50	60	0.060	60	1.8
	kleine	langsam dränend	50 - 10	300	0.300	300	2.5
Mittelporen		pflanzenverfügbares Haftwasser	10 – 0.2	15000	15	15000	4.2
Feinporen		nicht pflanzenverfügbares Wasser („Totwasser“)	<0.2				> 4.2

3.2 Durchführung

3.2.1 Aktuelle Masse (feldfeucht)

- Filterpapier mit einem Gummiring am Stechring befestigen, und zwar jeweils an der stumpfen Seite. Dadurch soll vermieden werden, dass Bodenpartikel herausfallen.

[2] Die Saugspannung des Bodenwassers kann Werte bis zu 10.000 oder sogar 100.000 cm Wassersäule annehmen. Um diese großen Zahlen zu vermeiden, wurde der pF-Wert eingeführt. Das ist der dekadische Logarithmus der Saugspannung des Wassers, angegeben in cm Wassersäule (pF 1 entspricht 10 cm Wassersäule).

- Wiegen der Stechringe mit Inhalt (= Brutto-Frischmasse großer Stechring feldfeucht)

3.2.2 Kapillare Aufsättigung

Die Proben werden vorsichtig in ein Wasserbad gestellt, um alle kapillaren Poren mit Wasser zu sättigen. Je nach Wasserleitfähigkeit kann das einige Minuten bis Stunden dauern. Die Sättigung ist daran zu erkennen, dass die Bodenoberfläche feucht glänzend erscheint.

3.2.3 Großen Stechringe (100 cm^3)

- Kapillar gesättigten Proben auf die keramische Platte im Drucktopf stellen.
- Drucktopf verschließen.
- Kleine Stechringe aus überzähligen Proben entnehmen => siehe nachfolgendes Kapitel 3.2.4
- Druckstufe 300 mbar anlegen (Grobporen). Die Lufteintrittsspannung der Keramikplatte beträgt pF 3. Unterhalb dieser Wasserspannung sind die Platten im wassergesättigten Zustand für Luft undurchlässig, die Konvektion von Wasser ist dagegen möglich. Die Druckdifferenz von 300 mbar wird dadurch erreicht, dass die Unterseite der Keramikplatte über einen Schlauch mit dem atmosphärischen Druck in Verbindung steht (siehe Abbildung).
  Anmerkung: Aus Zeitgründen wird im Praktikum die 60 mbar Druckstufe übersprungen und gleich die zweite Druckstufe bei 300 mbar eingestellt.

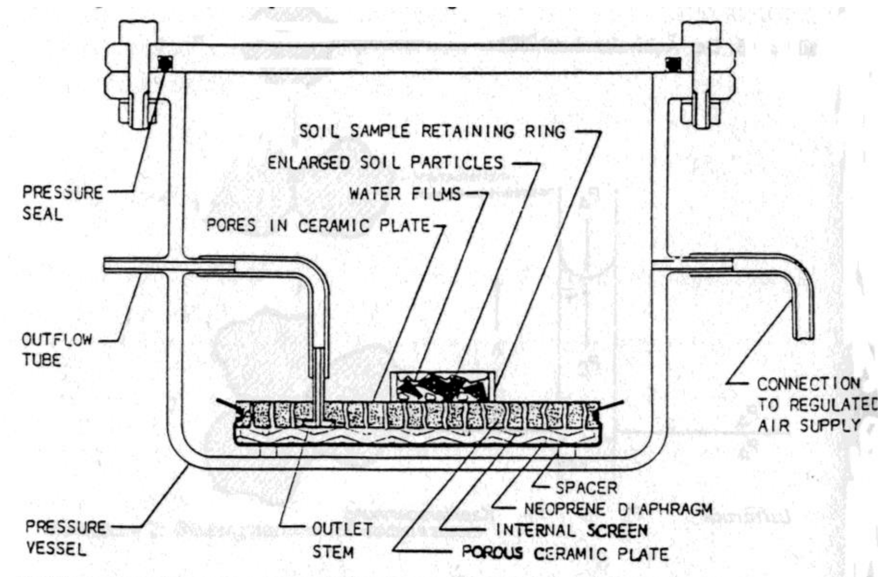


Abbildung 6: cross section view of ceramic pressure cell and soil sample,in extractor

- Drucktopf öffnen, wenn die Proben soweit entwässert sind, dass kein Wasser mehr austritt[3)].
- Wiegen der Stechringe mit Inhalt, die Masse jeweils notieren („Brutto-Masse nach 300 mbar“).
- Gummiringe entfernen (**ganz wichtig,** um das Verschmurgeln des Gummis zu vermeiden).
- Trocknen der Stechringe mit Inhalt im Trockenschrank bei 105 °C über Nacht.
- Entnehmen der Stechringe aus dem Trockenschrank
- Abkühlen der Proben.
- Wiegen der getrockneten Stechringe mit dem Bodeninhalt („Brutto-Masse nach 105 °C“ = Brutto-Trockenmasse). Die Gewichtsdifferenz zwischen Brutto-Trockenmasse und der Wägung nach 300 mbar entspricht dem trocknungsbedingten Wasserverlust aus den Mittel- und Feinporen.
- Entfernen des getrockneten Bodens aus den Stechringen.
- Säubern des Stahlrings und diesen abtrocken.
- Tara (Stechring, Gummiring und Filterpapier) ermitteln. Die Differenz zwischen Brutto-Trockenmasse und Tara entspricht der Netto-Trockenmasse des Bodens in dem Stechring.

3.2.4 Kleine Stechringe (Stechringunterproben)

- Entnehmen von Stechringunterproben, indem aus einigen überzähligen großen Stechringproben, die nicht für das Abdrücken bei 300 mbar vorgesehen sind, kleine Stechringe (1 cm Tiefe) in den Boden der großen Ringe gedrückt werden. Die kleinen Stechringe werden dann herauspräpariert.
- Kleine Stechringproben auf Keramikplatte setzen. Aus den kleinen Stechringproben wird das Wasser mit einem Druck von 15000 mbar (= pF 4,2) herausgedrückt. Die als Grob- und Mittel-

---
[3)] Im Praktikum nach 2 Tagen

poren definierten Poren sind anschließend frei von Wasser. Zum Abdrücken wird ein, stabilerer Drucktopf verwendet als für die großen Stechringe und eine Keramikplatte mit feineren Poren (Lufteintrittsspannung über pF 4,2). Bei so hohen Wasserspannungen ist es besonders wichtig, dass zwischen der Bodenprobe und der Keramikplatte eine gute kapillare Verbindung besteht. Um das sicherzustellen, wird eine wassergesättigte Paste aus dem restlichen Boden des Stechzylinders hergestellt und diese als Kleks auf die Platte gegeben. Die Stechringunterprobe wird dann auf diese Paste aufgesetzt und eingeschlämmt. Der Anteil des in den Feinporen gebundenen Wassers ist im Wesentlichen eine Funktion der Körnung (Bodenart) und der organischen Substanz. Die Lagerung der Partikel ist dagegen für die Feinporen unwesentlich. Das Feinporenwasser wird deshalb durch das als Paste verarbeitete Bodenmaterial kaum beeinflusst.

- Drucktopf verschließen.
- Abdrücken der kleinen Stechringproben mit 15 bar, bis kein weiteres Wasser austritt.
- Drucktopf öffnen und die kleinen Stechringproben entnehmen[4)].
- Bodeninhalt aus den kleinen Stechringen in Wägegläschen geben, deren Tara-Gewicht zuvor bestimmt wurde.
- Wägegläschen incl. Deckel und Boden auf einer Analysenwaage wiegen (= Brutto-Trockenmasse der Unterprobe).
- Wägegläschen mit Bodenproben bei **geöffnetem(!) Deckel** im Trockenschrank bei 105 °C über Nacht trockenen.
- Nach dem Trocknen die Wägegläschen (noch mit geöffnetem Deckel) in einem Exsikkator abkühlen lassen.
- Verschließen der Wägegläschen, nachdem sie vollständig abgekühlt sind.
- Wiegen auf einer Analysenwaage. Die Gewichtsdifferenz zwischen der Wägung nach dem Abdrücken bei 15000 mbar und der Wägung nach der 105 °C-Trocknung entspricht der Masse des Wassers in den Feinporen.

3.3 Auswertung

Die folgende Tabelle enthält realistische Werte, die als Beispiel für die Berechnung dienen sollen:

Großer Stechzylinder

A	Brutto-Masse mit Inhalt großer Stechring (feldfeucht)	290,21 g
C	Brutto-Masse mit Inhalt großer Stechring (nach 300 mbar)	293,68 g
D	Brutto-Trockenmasse großer Stechring (nach 105 °C)	267,15 g
E	Tara großer Stechring	108,43 g
F	Innenvolumen großer Stechring	100 ml
G	Netto-Trockenmasse des Bodens im großen Stechring	158,72 g
d_B	Trockenrohdichte	1,59 g/cm^3
LD_{eff}	Effektive Lagerungsdichte bei 15 % Ton im Boden	1,725 g/cm^3

Kleiner Stechzylinder

H	Tara Wägegläschen für Boden aus kleinem Stechring	14,4103 g
I	Gläschen mit Boden nach 15000 mbar (brutto)	23,1205 g
J	Gläschen mit Boden nach 105°C (brutto)	22,2902 g
d_F	Dichte der Festsubstanz ca. 2,65 g/cm^3 (nicht gemessen)	2,65 g / cm^3
M	Netto-Trockenmasse des Bodens im kleinen Stechring	7,8799 g

4 Im Praktikum nach 2 Tagen, eine längere Zeit der Entwässerung wäre allerdings besser

Porenanteile (Volumen %)

N	Feinporen	16,75
O	Mittelporen + Feinporen	26,53
P	Mittelporen	9,78
R	Grobporen	12,16
PV_{gesamt}	Gesamtporenvolumen	40,11
H2O	Wasseranteil feldfeucht	23,06
LUFT	Luftanteil feldfeucht	17,05
FEST	Festsubstanzanteil feldfeucht	59,89
PZ	Porenziffer	0,66

Beispielrechnung:

Netto-Trockenmasse des Bodens im <u>großen</u> Stechring (G)

G [g] = D - E
= 267,15 g - 108,43 g = 158,72 g

Netto-Trockenmasse des Bodens im <u>kleinen</u> Stechring (M)

M [g] = J - H
= 22,2902 g - 14,4103 g = 7,8799 g

Volumen des Wassers (feldfeuchte Probe) in %

$$H2O = \frac{(A-D)/d_{Wasser}}{F} \times 100$$

= (290,21 g - 267,15 g) = 23,06 g H_2O je 100 cm^3 Bodenvolumen
= 23,06 Volumen % bei Dichte d_{Wasser} von 1 g/cm^3

Trockenrohdichte (d_B)

d_B [g/cm^3] = G / F
= 158,72 g / 100 cm^3
= 1,59 g/cm^3

Effektive Lagerungsdichte LD_{eff}

LD_{eff} = d_B + 0,009 × Gew.% Ton
= 1,59 + 0,009 x 15
= 1,725 g/cm^3 Boden

Volumen der Festsubstanz in %

Festsubstanz [$cm^3/100\ cm^3$] = G / (d_F x F) x 100
= 158,72 g / (2,65 g/cm^3 x 100 cm^3) x 100 = 59,89 %

Gesamtporenvolumen (PV_{gesamt}) in %

$$PV_{gesamt} = \left(1 - \frac{d_B}{d_F}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1,5872}{2,65}\right) \times 100 = 40,11\ \%$$

Volumen der luftgefüllten Poren im feldfeuchten Zustand

LUFT = PV_{gesamt} – H2O
= 40,11 % - 23,06 % = 17,05 %

Porenziffer

PZ $= d_F/d_B - 1$

$= 2{,}65 / 1{,}59 - 1 = 0{,}66$

Feinporen in Vol. %

$$N = \frac{(I-J)/d_{Wasser}}{M/d_{Boden}} \times 100$$

$$= \frac{(23{,}1205-22{,}2902)/1}{7{,}8799/1{,}59} \times 100$$

$= 0{,}8303 / 4{,}9559 \times 100 = 16{,}75\ \%$

Mittelporen + Feinporen in Vol. %

$$O = \frac{(C-D)/d_{Wasser}}{F} \times 100$$

$$= \frac{(293{,}68-267{,}15)/1}{100} \times 100 = 26{,}53\ \%$$

Mittelporen in Vol. %

P $= O - N$

$= 26{,}53\ \% - 16{,}75\ \% = 9{,}78\ \%$

Grobporen in Vol. %

Gesamtporenvolumen (PV_{gesamt})	40,11 Vol%
Feinporen	- 16,75 Vol%
Mittelporen	- 9,78 Vol%
⇒ Grobporen	13,58 Vol%

Erläuterungen:
Das Gesamtporenvolumen kann über die Trockenrohdichte bei den meisten mineralischen Böden hinreichend genau bestimmt werden. Das Prinzip beruht darauf, dass das Porenvolumen über das Verhältnis der **Trockenrohdichte (d_B)** und der **Dichte der Festsubstanz (d_F)** berechnet wird (Formel siehe Beispielrechnung)

Bis ca. 4 Gew. % Humus ist die Dichte der Festsubstanz praktisch identisch mit der des Quarz (2,65 g cm^{-3}). Die Dichte der Festsubstanz braucht deshalb nicht unbedingt bestimmt zu werden.

Die **Trockenrohdichte (d_B)** wird häufig auch als Lagerungsdichte (LD) bezeichnet. Man versteht darunter die Masse einer wasserfreien Bodenprobe im Verhältnis zu ihrem Volumen in natürlicher Lagerung (inclusive Porenraum):

$$d_B\ [g\ cm^{-3}] = \frac{\text{BruttoTrockenmasse}\ [g] - \text{TaraStechzylinder}\ [g]}{\text{Stechzylinderinhalt}\ [cm^3]}$$

Im Oberboden beträgt die Trockenrohdichte meistens zwischen 1,4 und 1,6 g cm^{-3}.
Durch die Trocknung der Probe im Ofen bei 105 °C wird auch Wasser entfernt, das unter normalen Umständen im Boden nicht beweglich wäre, so genanntes Adsorptionswasser. Dieser Effekt ist umso größer, je mehr Ton in der Probe enthalten ist. Von manchen Bodenkundlern wird deshalb gerne ein Wert angegeben, bei dem dieser Effekt durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt wird (= **effektive Lagerungsdichte, LD_{eff}**). Der Korrekturfaktor beträgt 0,009 g/ml je Gewichtsprozent Ton: $LD_{eff} = d_B + 0{,}009 \times$ Gew.% Ton

Gelegentlich wird statt des Porenvolumens auch die **Porenziffer (PZ)** angegeben. Sie bezeichnet das Verhältnis von Porenvolumen zum Volumen der Festsubstanz und kann ebenfalls aus dem Dichteverhältnis berechnet werden (Formel in der Beispielrechnung).

3.4 Darstellung und Bewertung

3.4.1 Kennziffern der Porosität

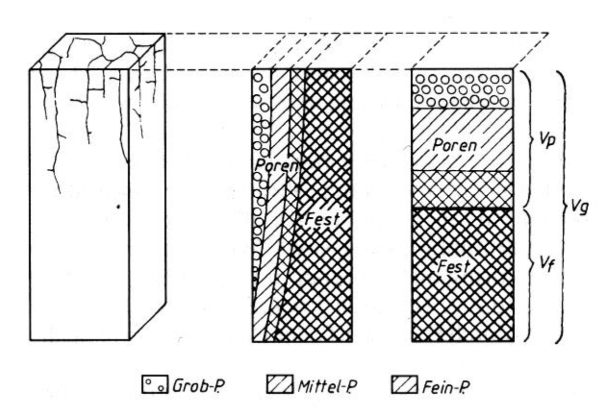


Abb. 5.1–7 Anteile des Porenraums am Gesamtvolumen als Basis für die Berechnung von Porenvolumen (= Porosität) und Porenziffer; V_p = Volumen der Poren, V_f = Feststoffvolumen, V_g = Gesamtvolumen.

Das Ergebnis der Messung des Porenvolumens kann in Form der Trockenrohdichte, des Porenvolumens und der Porenziffer tabellarisch oder grafisch für die unterschiedlichen Bodenhorizonte oder für das gesamte Profil dargestellt werden (siehe Beispiel aus Scheffer/Schachtschabel, 1998). Die **Trockenrohdichte** ist ein anschaulicher Wert. Sie wird benötigt, wenn Bodenchemische Kennwerte (z.B. Nährstoffgehalte je kg Boden) auf die Fläche umgerechnet werden sollen. In Mineralböden liegt die Trockenrohdichte meist zwischen 1,4 und 1,6 g cm^{-3}. Werte unter 1,45 g cm^{-3} werden in der Kartieranleitung als gering bzw. sehr gering (< 1,25) eingestuft. Werte über 1,65 als hoch bzw. sehr hoch (>1,85). Torfböden haben typischerweise eine Trockenrohdichte im Bereich von 0,2 bis 0,3 g cm^{-3}.

Das **Porenvolumen** (PV bzw. n) liefert als Prozentzahl ebenfalls einen anschaulichen Wert. In der Regel liegt der Anteil des Porenvolumens bei Mineralböden zwischen 40 und 50 %. Werte unter 38 % deuten auf starke Verdichtungen hin. Von Verdichtungen betroffen sind vor allem die sekundären Grobporen in Schluff- und Lehmböden. PV-Werte über 55 % treten kurz nach einer lockernden Bodenbearbeitung auf oder in biologisch sehr aktiven Ah-Horizonten bzw. in Horizonten mit erhöhtem Humusgehalt (Rohhumus, Moder). In Moorböden und in Böden mit frischer Tonablagerung kann der Porenanteil wesentlich höher liegen und Werte zwischen 60 und 90 % erreichen.

Die **Porenziffer** (PZ bzw. ε) eignet sich besonders dann zur Charakterisierung der Bodenstruktur, wenn es zum Beispiel bei meliorativen Eingriffen zu großen Volumenänderungen des Bodens kommt, da die Angabe des Porenanteils als Bezugsgröße das Gesamtvolumen hat (das sich ja mit dem Eingriff ändert). Die Porenziffer hat als Bezugsgröße das Festsubstanzvolumen, das sich durch den Eingriff nicht ändert. Meliorative Maßnahmen, die mit einer Volumenänderung einhergehen, sind zum Beispiel die Tiefenlockerung oder die Entwässerung von Mooren und Marschen. Bei Mineralböden geht die Spanne der Porenziffern von 0,7 im Unterboden bis zu 1,2 im Oberboden. Werte über 1,5 sind nur unmittelbar nach einer Bodenbearbeitung und in den obersten Horizonten von Waldböden zu erwarten. In Moorböden können Porenziffern bis zu 9 auftreten.

Häufig auftretende Kennziffern der Porosität:

	Trockenrohdichte	Porenvolumen	Porenziffer
	d_B [g cm^{-3}]	PV [%]	PZ
Mineralboden			
geringe Lagerungsdichte	< 1,45	> 55%	> 1,2
mittlere Lagerungsdichte	1,45 bis 1,65	40 – 50%	0,7 bis 1,0
hohe Lagerungsdichte	> 1,65	< 38%	< 0,6
Organische Böden	0,2 bis 0,3	60 bis 90 %	1,5 bis 9,0

3.4.2 Größenverteilung der Poren

<u>Vergleich von Einzelhorizonten</u>

Um einzelne Proben bzw. Einzelhorizonte miteinander zu vergleichen, eignen sich besonders halblogarithmische Summenkurven oder Blockdiagrammme:

a) Volumetrischer Wassergehalt in Abhängigkeit von der Saugspannung (= pF-Kurve)
b) Porenvolumen in Abhängigkeit vom Äquivalenzporendurchmesser.

Tiefenfunktion im Bodenprofil
Um ganze Bodenprofile darzustellen, braucht man für jeden Horizont eine separate pF-Kurve. Hier ist es übersichtlicher, wenn Linien gleicher Wasserspannung in Abhängigkeit von der Tiefe in ein Diagramm eingezeichnet werden. Die Linien sind gleichbedeutend mit dem Verlauf des Anteils an bestimmten Äquivalentporengrößen im Profil (siehe Bsp. aus Scheffer/Schachtschabel oben).

3.5 Fehler der Ergebnisse

Die vor allem durch **Inhomogenität** im Bodenprofil hervorgerufene Streuung der gemessenen Porenvolumina liegt im Oberboden meist im Bereich von s = ± 4%. Im Unterboden ist die Streuung in der Regel nur etwa halb so hoch, weil dort die Böden homogener sind. Bei Stechzylindern mit größerer Fläche wirkt sich kleinräumige Inhomogenität nicht so stark aus. Dafür gewinnt dann das Problem der Fehlstellen an Bedeutung.
Fehlstellen entstehen an den Schnittflächen der Stechzylinderproben zum Beispiel durch das Herausbrechen von Steinen oder Aggregaten. Das Volumen der Fehlstellen kann abgeschätzt werden, indem die Fehlstellen mit Quarzsand aufgefüllt werden und die dafür benötigte Sandmenge gemessen wird. Verwendet man, um Fehlstellen möglichst zu vermeiden, Stechzylinder mit kleiner Querschnittsfläche und größerer Länge, so besteht die Gefahr, dass es beim Eintreiben der Zylinder zur Verdichtung der Probe kommt.
Die Verwendung von **kleinen Zylindern** führt zudem zu einer Überschätzung der Lagerungsdichte, da der Probenehmer Risse und Spalten bei der Entnahme meiden wird. Insbesondere bei Problemböden, die beträchtliche Mengen an organischer Substanz oder Ton enthalten und die deshalb stark quellen und schrumpfen, ist es schwierig, eine repräsentative Probe zu entnehmen. Am besten werden die Proben bei Feldkapazität entnommen.
Aus Böden, die **große Wurzeln**, **große Poren** oder **viele Steine** enthalten, lassen sich nur schwer Stechzylinderproben entnehmen. Hier müssen andere Methoden angewandt werden. Auch bei **Moorböden** können nur schwer volumentreue Stechzylinderproben entnommen werden.
Wurzeln und Bodentiere, die sich in den Poren der Probe befinden, werden teils als Wasservolumen und teils als Festsubstanz gemessen. Gelöste **Salze** erscheinen immer als Festsubstanz.

Beim Abdrücken besteht eine häufige Fehlerquelle in einem **unzureichenden Kontakt** der Proben mit der Keramikplatte. Die Entwässerung erfolgt dann sehr viel langsamer. Wenn dies unbemerkt bleibt, erscheint der Wassergehalt zu hoch. Die Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Wassergehalt und Wasserspannung dauert auch bei gutem Kontakt der Probe zur Keramikplatte zum Teil sehr lange. Die Dauer ist abhängig von der Höhe des Stechzylinders (exponentiell) und der Wasserspannung sowie von der Wasserleitfähigkeit der Proben im entsprechenden Sättigungsbereich. Folgende Zahlen zeigen die Größenordnung an, wie lange es dauern kann, bis sich das Gleichgewicht eingestellt hat (Hartge und Horn, 1992):

Wasserspannung	Probenhöhe	Zeitspanne
20 mbar	2 cm	~ 15 min
60 mbar	1 cm	~ 2 h
60 mbar	2 cm	~ 18 h
300 mbar	1 cm	~ 4 d
300 mbar	4 cm	~ 14 d
15000 mbar	1 cm	~ bis zu 14 d

Die Umrechnung der Wasserspannung in Äquivalentporendurchmesser setzt voraus, dass das **Porensystem starr** ist und sich bei der Entwässerung nicht ändert. Das ist bei Sandböden meist der Fall, bei Schluff- und Lehmböden im Unterboden aber nicht immer. Tonböden schrumpfen oft beträchtlich beim Entwässern. Die SI-Einheit für den Druck ist Pa (N/m^2): 1 hPa = 1 mbar. Beim

Umrechnen der Druckeinheiten wird häufig vernachlässigt, dass 1 cm Wassersäule (4 °C) nur 0,9806 mbar entspricht. Der Fehler ist allerdings für die Praxis nicht bedeutend.

3.6 Interpretation

Die Poren im Boden sind teilweise durch die Textur bedint (Primärporen) und teilweise durch bodenbildende Prozesse (z.B. Quellen und Schrumpfen, Frost- und Tauzyklen, Aktivität von Bodentieren) bedingt. Diese pedogen entstandenen Poren werden auch Sekundärporen genannt.

Die **Grobporen** sind vor allem wichtig als Lebensraum für die Bodentiere und das Eindringen von Pflanzenwurzeln sowie für den Gasaustausch der Bodenluft mit der Atmosphäre. Neben dem Volumen an Grobporen ist dabei vor allem auch deren Kontinuität ausschlaggebend. An der Bodenoberfläche sind Grobporen für die schnelle Infiltration von Niederschlagswasser wichtig. In Sandböden sind die Grobporen vor allem texturbedingt und deshalb durch die Bodenbearbeitung nur in geringem Maße zu beeinflussen. Extrem sandige Böden erreichen zwischen 25 und 35 Vol% Grobporen. Bei Schluff-, Lehm- und Tonböden sind die Grobporen vor allem Sekundärporen. Verdichtungen des Bodens gehen bei diesen Böden mit einer starken Verminderung der Grobporen einher. Häufige Werte liegen zuwischen 5 und 15 Vol%.

Die **Mittelporen** sind besonders wichtig für die Speicherung und die Leitung von pflanzenverfügbarem Wasser. Das Volumen der Mittelporen wird auch als nutzbare Feldkapazität bezeichnet (nFK). Ein Teil der engen Grobporen kann unter Umständen ebenfalls zur nFK beitragen. Die Wasserbewegung zu den Wurzeln erfolgt hauptsächlich über die Mittelporen. Durch das räumliche Nebeneinander von Porenwasser und Partikeloberfläche (mit den sorbierten Nährstoffen) wird eine rasche Ergänzung von Nährstoffionen ermöglicht, wenn diese durch die Pflanzenwurzeln aufgenommen werden (Nährstoffnachlieferung, -pufferung). Die Mittelporen bieten den Bodenbakterien einen optimalen Lebensraum, da diese für normales Wachstum vollständig in den Wasserfilm eintauchen müssen, die meisten Mikroorganismen zugleich aber auch Sauerstoff benötigen. Besonders hohe Anteile an Mittelporen haben Lehm- und Schluffböden (ca. 15% ± 5). Bei Sandböden ist der Anteil oft nur halb so groß. Tonböden liegen dazwischen. Mittelporen sind zum großen Teil Primärporen. Ihr Anteil wird durch Bildung von Mikroaggregaten und Ton-Humuskomplexen erhöht, was besonders bei Sandböden wichtig ist (Versorgung mit organischer Substanz!). Extrem hohe Anteile an Mittelporen haben organische Böden (Moore und Anmoore 30 bis 50Vol%).

Die **Feinporen** sind ganzjährig mit Wasser gefüllt. Das in den Feinporen gebundene Wasser ist nicht pflanzenverfügbar. Der pF-Wert von 4,2 kennzeichnet deshalb den permanenten Welkepunkt (PWP). Der Anteil an Feinporen ist in Tonböden besonders groß (ca. 30 bis 40 Vol%) und in Sandböden sehr gering (< 10 Vol%). Lehm- und Schluffböden liegen dazwischen. Feinporen sind fast ausschließlich texturell bedingte Primärporen. Bei Sandböden ist der Anteil Feinporen abhängig vom Humusgehalt. Böden mit einem hohen Anteil an Feinporen (Ton- und Lehmböden) erwärmen sich aufgrund des durch die Feinporen bedingten hohen Wassergehaltes im Frühjahr langsamer. Wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit und der hohen Wärmekapazität des in den Feinporen gebundenen Wassers sind diese Böden allerdings auch kaum Nachtfrost gefährdet.

3.7 Protokoll

Name:	Gruppe	Arbeitsplatz-Nr.	Datum:

Bodenprobe (Stechring-Nr., Entnahmetiefe und -richtung, Standort)

Großer Stechzylinder

A	Brutto-Masse großer Stechring (feldfeucht)	g
C	Brutto-Masse großer Stechring (nach 300 mbar)	g
D	Brutto-Trockenmasse großer Stechring (nach 105 °C)	g
E	Tara großer Stechring	g
F	Innenvolumen großer Stechring	100 cm^3
G	Netto-Trockenmasse des Bodens im großen Stechring	g
d_B	Trockenrohdichte	g/cm^3
LD_{eff}	Effektive Lagerungsdichte bei .... % Ton	g/cm^3

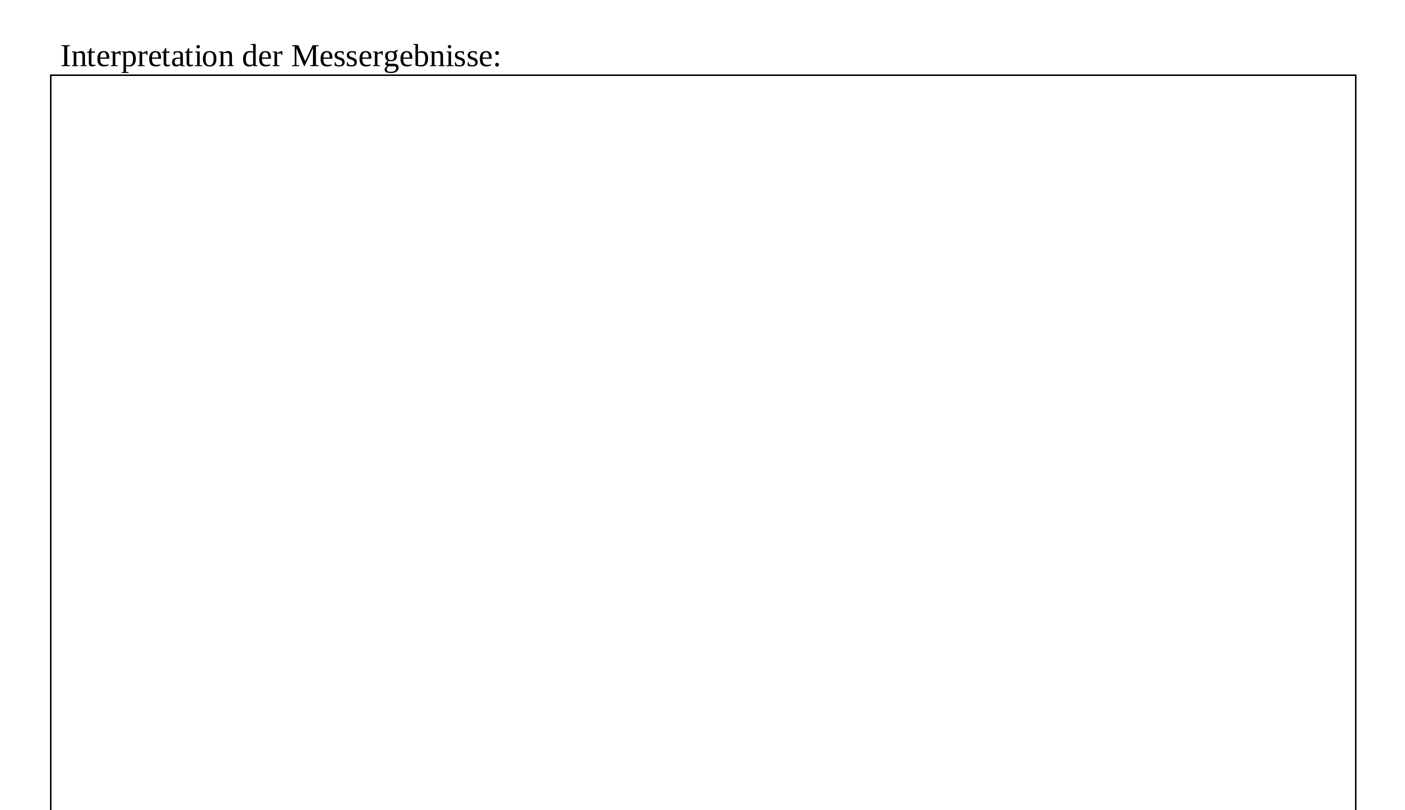
Kleiner Stechzylinder

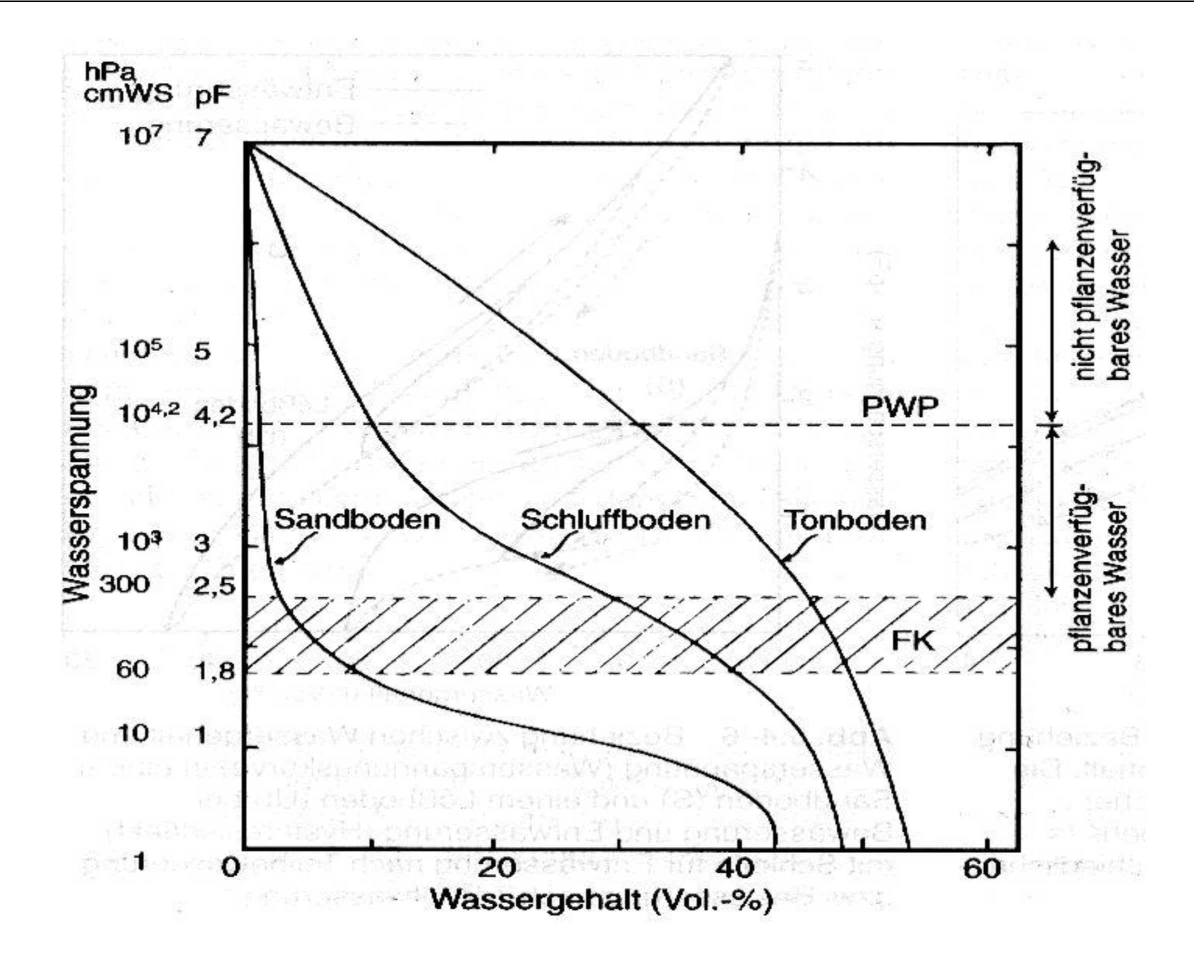
H	Tara Wägegläschen für Boden aus kleinem Stechring	g
I	Gläschen mit Boden nach 15000 mbar (brutto)	g
J	Gläschen mit Boden nach 105°C (brutto)	g
d_F	Dichte der Festsubstanz (nicht gemessen)	2,65 g/cm^3
M	Netto-Trockenmasse des Bodens im kleinen Stechring	g

Porenanteile (Volumen %)

N	Feinporen	
O	Mittelporen + Feinporen	
P	Mittelporen	
R	Grobporen	
PV_{gesamt}	Gesamtporenvolumen	
H2O	Wasseranteil feldfeucht	
LUFT	Luftanteil feldfeucht	
FEST	Festsubstanzanteil feldfeucht	
PZ	Porenziffer	

Interpretation der Messergebnisse:



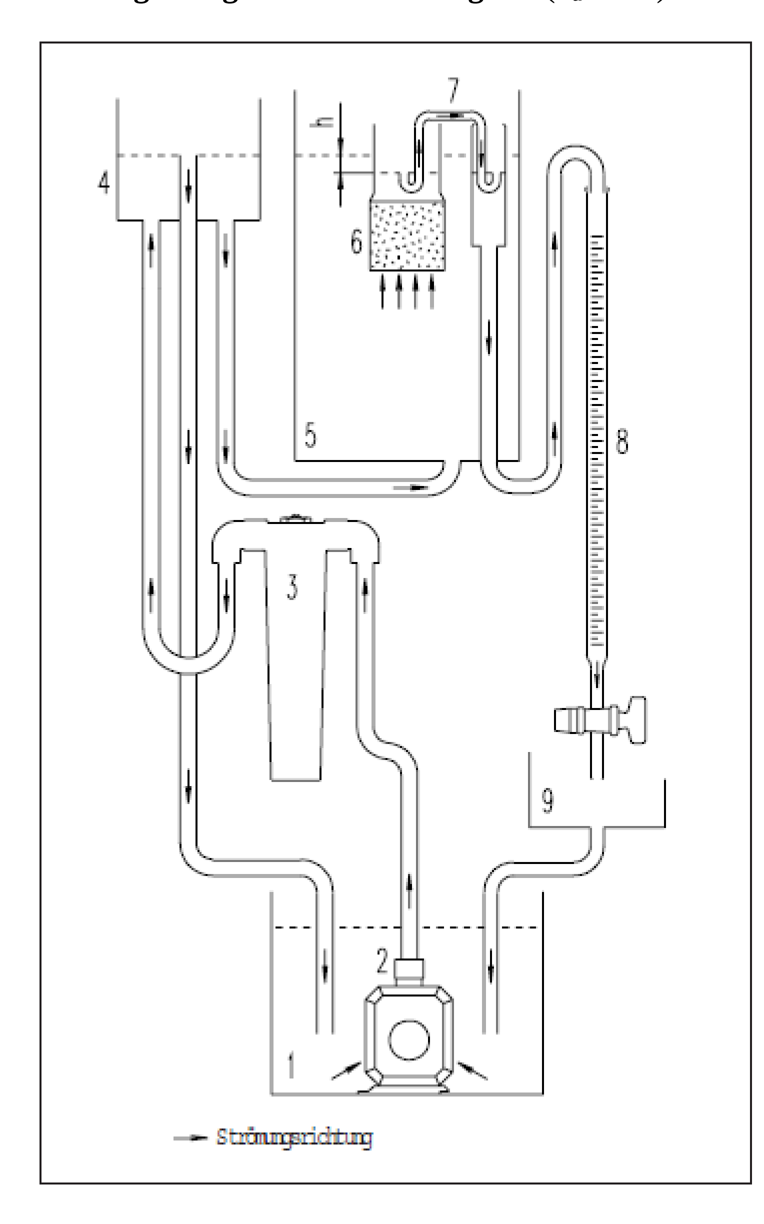


Die eigenen Messwerte in die Grafik eintragen!

4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit: k_f-Wert

4.1 Einleitung

Wenn Wasser durch das Porensystem des Bodens fließt, so stellt er für die Bewegung des Wassers einen Fließwiderstand dar. Die Wasserleitfähigkeit ist sinngemäß nichts anderes als der **Kehrwert des Fließwiderstandes**. Für die Fließbewegung stellen nicht nur die festen Bodenpartikel einen Widerstand dar, sondern auch luftgefüllte Poren, sofern der Wasserdruck nicht ausreicht, die Luft aus den Poren zu treiben. Es ist deshalb zu unterscheiden zwischen der Wasserleitfähigkeit im ungesättigten Zustand (k_u-Wert = Poren teilweise mit Luft gefüllt) und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f-Wert = alle Poren vollständig mit Wasser gefüllt). Für die Messung von k_u und k_f werden unterschiedliche Verfahren verwendet und beide Methoden dienen verschiedenen Fragestellungen.
Die **gesättigte Wasserleitfähigkeit** (k_f-Wert) spielt eine wichtige Rolle bei Fragen zur Dränung, Bewässerung und der Ergiebigkeit von Brunnenbohrungen sowie bei Untersuchungen zur Ausbreitung von Verunreinigungen im Grundwasserleiter. Außerdem gibt die gesättigte Wasserleitfähigkeit sehr empfindliche Hinweise auf beginnende Gefügeveränderungen (z.B. Pflugsohle, Meliorationsbedürftigkeit) und bodengenetische Aspekte (z.B. Gley bzw. Pseudogley). Da die gesättigte Wasserleitfähigkeit (im Unterschied zur ungesättigten) maßgeblich durch den Anteil an Grobporen und deren Kontinuität abhängt, liefert der kf-Wert im Boden indirekt wichtige Hinweise für die von den Grobporen abhängigen Bodeneigenschaften: Durchwurzelbarkeit und Gasaustausch.
Die **ungesättigte Wasserleitfähigkeit** (k_u-Wert) kennzeichnet dagegen die kapillare Wasserleitung, die in den terrestrischen und semiterrestrischen Böden in der Regel dominiert. Für die Wasserversorgung der Pflanzen ist deshalb der k_u-Wert und nicht der kf-Wert ausschlaggebend.



Der Fließwiderstand, den ein Boden dem perkolierenden Wasser entgegen stellt, hängt entscheidend von der Form und der Größe der Poren ab und damit von der räumlichen Anordnung der Partikel im Boden. Die Untersuchung der Leitfähigkeit (Kehrwert des Fließwiderstandes) erfolgt deshalb an Proben in natürlicher Lagerung (Stechzylinderproben). Das Prinzip der Messung beruht auf der von DARCY formulierten Gleichung für den laminaren Wasserfluss:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{A \cdot h}{l} \cdot k$$

- Q: perkolierende Wassermenge *V* pro Zeiteinheit *t* (cm^3 / sec)
- A: Fläche der Bodenprobe orthogonal zur Fließrichtung (cm^2)
- h: Hydrostatische Druckdifferenz gemessen als Höhe einer Wassersäule (cm)
- k: Leitfähigkeitskoeffizient (Durchlässigkeitsbeiwert), angegeben in der Einheit cm/sec
- l: Länge der Durchflußstrecke (= Dicke der Bodenprobe)

Im Praktikum bestimmen wir den Leitfähigkeitskoeffizienten (k_f-Wert), indem alle anderen Größen der DARCY-Gleichung konstant gehalten bzw. gemessen werden.

4.2 Durchführung

Versuchsaufbau

Die Messung des k_f-Wertes erfolgt mit der in der Abbildung gezeigten Messanordnung. Die Wasserdurchlässigkeit wird bestimmt, indem an beiden Seiten einer gesättigten Probe ein unterschiedlicher Wasserdruck erzeugt und der dadurch entstehende Wasserdurchfluss gemessen wird. Hiezu wird Wasser aus einem Vorratsbehälter (1) mittels einer Tauchpumpe (2) über ein Filter (3) in einen in der Höhe verstellbaren Wasserstandsregler (4) gepumpt. Der Wasserstandsregler ist einerseits mit einem Kunststoffbehälter (5) verbunden und andererseits mit einem Rohr, durch welches überschüssiges Wasser in den Vorratsbehälter zurückfließt. Zur Beschränkung der Verdunstung während der Messung kann der Kunststoffbehälter mit einer Klappe verschlossen werden. Weil der Wasserstandsregler und der Kunststoffbehälter kommunizierende Röhren bilden, beeinflusst der Wasserstandsregler die Wasserhöhe im Kunststoffbehälter (die Höhe des Wasserstands im Regler ist gleich dem im Kunststoffbehälter). Ein Stechring mit Boden (6) wird in einen Ringhalter eingeführt (vorher mit Flies präparieren) und mit einer Siebkappe versehen. Der Ringhalter wird danach in den Kunststoffbehälter eingesetzt. Über einen Kunststoff-Saugheber (7) wird über der Probe stehendes Wasser in eine Bürette (8) geleitet. Das Wasser aus den Büretten fließt in eine Auffangschale (9) und dann zurück in den Vorratsbehälter. Durch die Wirkung des Saughebers entsteht ein Höhenunterschied (h) zwischen dem Wasserstand innerhalb und außerhalb des Ringhalters. Der Höhenunterschied verursacht einen kontinuierlichen Wasserfluss durch die Probe. Die Höhe des Wasserstands wird mit einer Einpunkt-Messbrücke gemessen. Durch Auffangen des Wassers in der Bürette über eine bestimmte Zeit kann mit Hilfe der unten stehenden Formel der Durchlässigkeitsbeiwert (der K-Faktor) der betreffenden Probe berechnet werden. Diese Formel gilt nur, wenn eine *stationäre Strömung* stattfindet.

Bei sehr dichten, tonhaltigen Proben, ist es manchmal nicht praktikabel, einen stationären Fluss herbeizuführen. In dem Fall wird eine andere Methode angewendet. Der prinzipielle Unterschied zu der oben beschriebenen Methode mit konstantem Höhenunterschied der Wasserspiegel besteht darin, dass nicht die abgeführte Wassermenge gemessen wird, sondern die Änderung des Wasserhöhenunterschiedes (∂h) in einem bestimmten Zeitintervall (∂t).

4.2.1 Auswertung

Die Auswertung erfolgt nach folgender Gleichung (Umformung der DARCY-Gleichung):

a) <u>Formel für konstanten Höhenunterschied</u> der Wasserspiegel

$$k_f = \frac{V \cdot l}{t \cdot A \cdot h}\left[\frac{cm^3 \cdot cm}{min \cdot cm^2 \cdot cm} = \frac{cm}{min}\right]$$

wobei:

V = Wasservolumen, das durch die Probe fließt (cm^3 oder ml)

h = Wasserhöhenunterschied inner- und außerhalb des Ringhalters (cm)

l = Länge der Bodenprobe (bei den von uns verwendeten Ringen = 4 cm)

A = Querschnittsfläche der Probe (bei den von uns verwendeten Ringen 25 cm^2)

t = Zeit, die für den Durchfluss des Wasservolumens V benötigt wurde (min)

Anschaulichere Zahlenwerte liefert die Angabe des k_f-Wertes in cm je Tag:

$$\frac{cm}{Tag} = \frac{cm}{\min} \cdot 1440$$

Eine ausführliche Bedienungsanleitung des Permeameters mit weiteren Erklärungen zur Methode steht für die Praktikumsteilnehmer auf der Homepage zur Verfügung (Kennwort erforderlich).

In Deutschland ist für Böden folgende Einstufung üblich:

k_f-Werte [cm d^{-1}]	Bezeichnung	Zeichen	Beispiele
<1	sehr gering	kf1	Sd-Horizonte, Knickhorizonte
1 bis 10	gering	kf2	Sd-Übergangshorizonte, Sg-Horizonte, weniger ausgeprägte Knick- und Dwoghorizonte, stark zersetzte Torfe
10 bis 40	mittel	kf3	schluffreiche tonarme Schichten, mittel zersetzte Torfe
40 bis 100	hoch	kf4	Horizonte mit guter Gefügeentwicklung, fein- bis mittelkörnige Sande, mittel bis schwach zersetzte Torfe
100 bis 300	sehr hoch	kf5	Horizonte mit sehr guter Gefügeentwicklung, mittelkörnige Sande, schwach zersetzte Torfe
>300	extrem hoch	kf6	Horizonte mit sehr vielen biogenen Poren, sehr schwach zersetzte Torfe, schilfdurchwurzelte Tone, Grobsand, Kies

Für Deponieabdichtungen ist ein k_f-Wert von weniger als $5 \cdot 10^{-10}$ cm/sec ($4{,}32 \cdot 10^{-5}$ cm/d) erforderlich.

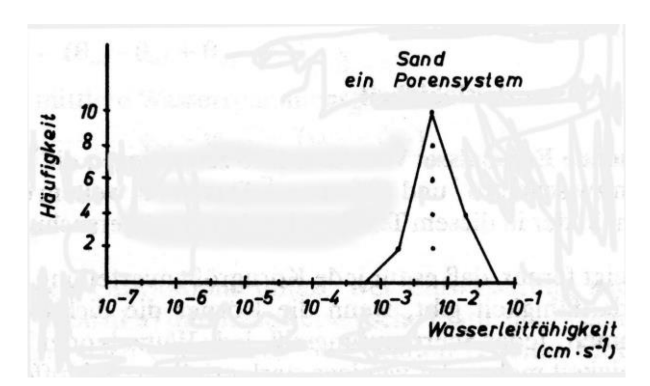
4.3 Darstellung

Modalwert

Die an Stechzylinderproben gemessenen k_f-Werte streuen erfahrungsgemäß sehr stark. Um einen repräsentativen Wert zu erhalten, sollte der k_f-Wert an mindestens 12 Parallelproben (üblich sind 16) gemessen werden und als Mittelwert nicht das arithmetische, sondern der Zentral- oder der Modalwert angegeben werden. Der Zentralwert (= Median) teilt die Werte in zwei gleich große Gruppen ober- und unterhalb des Wertes. Der Modalwert kennzeichnet den häufigsten Wert.

4.3.1 Häufigkeitsverteilung

Oft ist es sinnvoll, eine Häufigkeitsverteilung der k_f-Werte oder der Durchlässigkeitsstufen zu zeichnen, denn die Form der Verteilung ist in Böden oft aussagefähiger als die Veränderung eines Mittelwertes (Beispiel siehe Abbildung).



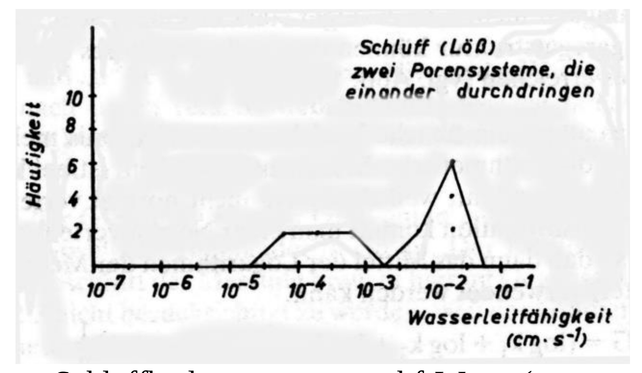


Abbildung: Verteilung der in einem Sand- und einem Schluffboden gemessenen kf-Werte (aus: Hartge und Horn, 1999)

4.4 Fehler

Innere Erosion: Die Struktur der wassergesättigten Bodenproben ist leicht zu zerstören. Sehr schnell perkolierendes Wasser, Druckstöße und Erschütterungen bewirken deshalb eine so genannte innere Erosion der Probe, verbunden mit irreversiblen Veränderungen der Perkolation.

Lange Perkolationszeit: Bei längerer Perkolationszeit treten weitere Veränderungen auf:

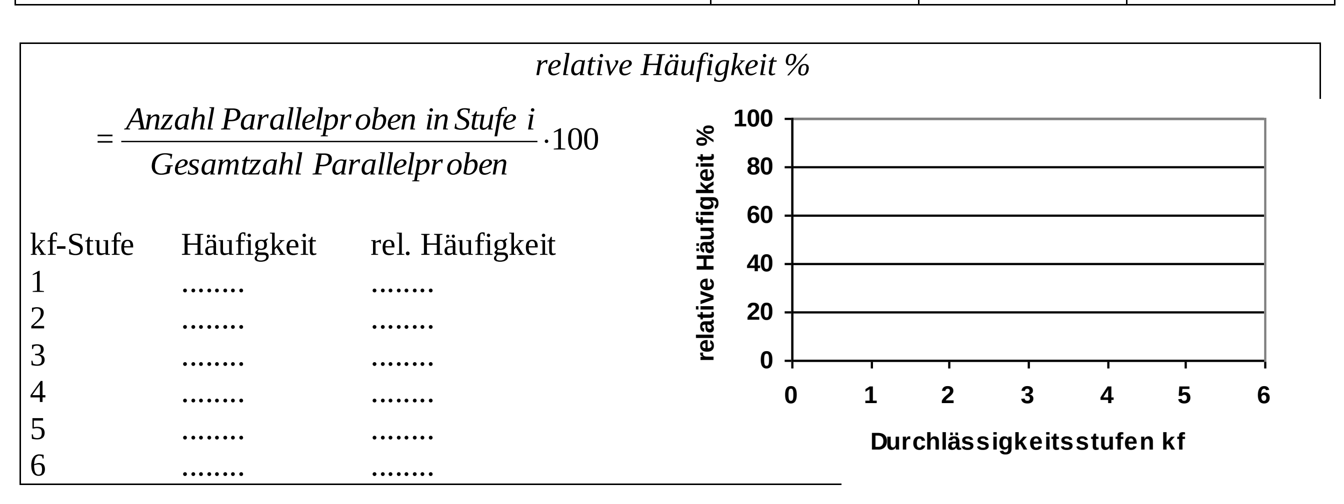
- Änderung des Quellungszustandes oft verstärkt durch Änderungen des Ionenbelags
- Luftabscheidung aus dem Perkolationswasser
- Bakterienwachstum

4.5 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.:	Datum:

Bodenprobe (Entnahmetiefe, und –richtung, Standort)
Stechring-Nr. ……. Messposition Nr………,
Querschnitt Ringhalter: a = 18 cm^2, Querschnittsfläche Stechring: A= 25 cm^2 , Länge l = 4 cm

Für das Protokoll „Porenvolumen und pF-Kurve“ Brutto-Masse feldfeucht (g)			
Wasserstand außen (cm)			
Wasserstand innen Start h_1 (cm)			
Uhrzeit Start (t_1)			
Uhrzeit Ende (t_2)			
Wasserstand innen Ende h_2 (cm)			
perkolierte Wassermenge: V (ml)			
Wasserstandsdifferenz außen - innen: h			
Δ t (Minuten und Sekunden)			
kf-Wert (cm/Tag)			
Durchlässigkeitsstufe (Kartieranleitung)			


relative Häufigkeit %

$$= \frac{Anzahl\ Parallelproben\ in\ Stufe\ i}{Gesamtzahl\ Parallelproben} \cdot 100$$

kf-Stufe	Häufigkeit	rel. Häufigkeit
1	……..	……..
2	……..	……..
3	……..	……..
4	……..	……..
5	……..	……..
6	……..	……..

Interpretation der Messergebnisse (Wasserhaushalt, Lufthaushalt, Durchwurzelungsfähigkeit, signifikante Unterschiede zwischen den Standorten):

5 Infiltration von Wasser (k_i-Wert mit Doppelringinfiltrometer)

5.1 Einleitung

Bei Wasserüberstau durch Starkregen oder Bewässerung ist es bedeutsam, dass das Wasser schnell in den Boden eindringt. Oberflächig abfließendes Wasser führt zu Erosion und Verschlämmung. In den meisten Fällen ist deshalb eine hohe Intensität der Wasserinfiltration gewünscht. Manchmal sind auch niedrige Infiltrationsraten erforderlich (z.B. Bewässerungsgräben).

5.2 Prinzip der Methode

Bei der Infiltrationsmessung werden die Verhältnisse von Überstauung bzw. Bewässerung simuliert. Dazu wird Wasser in einen Ring gegossen, der zuvor auf der Erdoberfläche dicht aufgesetzt bzw. einige Zentimeter tief eingetrieben wurde. Die Wasserversickerung wird durch das hydraulische Potential (Gravitation) und durch das Matrixpotential (Kapillarkräfte) angetrieben. Im Boden würde sich das Wasser bei dieser Versuchsanstellung nicht nur vertikal, sondern auch seitlich ausbreiten. Um das zu verhindern, wird ein Doppelring verwendet. Das im Außenring versickernde Wasser unterdrückt die seitliche Ausbreitung des im Innenring (244 cm^2) versickernden Wassers. Nur die Versickerung des Wassers im Innenring wird gemessen. Die Intensität der Versickerung hängt von zahlreichen Faktoren ab:

- Wassersättigung des Bodens
- Bodenart
- Vegetation
- hydrostatischer Druck (d.h. Höhe der Überstauung)
- Boden- und Wassertemperatur
- Schrumpfungs- und Quellungszustand des Bodens

5.3 Durchführung[5]

- **Doppelring-Infiltrometer**, ca. 10 cm waagerecht (Wasserwaage) in den Boden drücken (Verkanten vermeiden)
- Die Bodenfläche in den Ringen ca. 1 cm hoch mit **Grobsand** abdecken, um eine Verschlämmung der Bodenoberfläche zu vermeiden.
- **Lineal** in den Boden des Innenringes drücken.
- **Wasser** zuerst in den Außen- dann in den Innenring einfüllen (ca. 10 cm Stauhöhe).
- **Stoppuhr** einschalten und warten, bis der Wasserstand im Innengefäß 5 cm abgesunken ist.
- Wasserstand erneut auf das Ausgangsniveau auffüllen und wieder die Versickerungszeit messen. In der Regel stellt sich nach der dritten Anstauung eine Stabilisierung der Versickerungsgeschwindigkeit ein, so dass die vierte und fünfte Versickerungsphasen zur Auswertung herangezogen werden können.

[5] Für die Messung der Wasserinfiltration ist als DIN 19682 beschrieben, im Praktikum erfolgt eine etwas vereinfachte Form der Messung.

•

5.4 *Darstellung und Bewertung*

Die Rate der Infiltration wird als k_i-Wert bezeichnet und in der Einheit mm/h angegeben (= Liter je m^2 und Stunde). In Abhängigkeit von der Bodenart sind folgende k_i-Werte unter normalen Bedingungen zu erwarten:

Bodenart	**Mittel [mm/h]**	**Steuung [mm/h]**
Sand	50	25 – 2500
sandiger Lehm	25	12 – 75
Lehm	12	8 – 20
toniger Lehm	8	2,5 – 15
schluffiger Lehm	2,5	0,25 – 5
Ton	5,0	1,25 – 10

In Abhängigkeit vom k_i-Wert ist folgende Klassifizierung üblich:

Infiltrationsklasse	**k_i-Wert [mm/h]**
sehr gering	< 1
gering	1 – 5
gering-mittel	6 – 20
mittel	21 – 63
mittel-hoch	64 – 127
hoch	128 – 254
sehr hoch	> 254

5.5 *Fehler*

Eine Schwierigkeit der Methode besteht darin, den Doppenring an repräsentativen Stellen einer zu beurteilenden Fläche einzutreiben. Bereits einzelne Regenwurmgänge, Vegetationsrückstände oder Schrumpfungsrisse können die Infiltration gravierend beeinflussen. Wegen des Zeitaufwandes und der großen Mengen an Wasser (ca. 50 Liter) und Sand können meist auch nur wenige Stellen mit dem Doppelringinfiltrometer untersucht werden.
Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Interpretation der gewonnen Ergebnisse. Sowohl in Bewässerungsgräben als auch bei Starkniederschlägen wird die Bodenoberfläche durch das strömende Wasser und die aufprallenden Regentropfen im Zeitablauf verändert, was wiederum die Infiltrationsrate beeinflusst.

5.6 *Protokoll*

Name:	Gruppe	Arbeitsplatz-Nr.	Datum:

Standort der Messung, Beschaffenheit der Bodenoberfläche

Messergebnisse:	Messergebnisse:
Zeit (hh.mm.ss) Wasserstand (mm)	Zeit (hh.mm.ss) Wasserstand (mm)
Start:	Start: ....
Ende:	Ende: ....
Δ:	Δ: ....
Rate: [mm/min]	Rate: [mm/min] ....
--	--
Start:	Start: ....
Ende:	Ende: ....
Δ:	Δ: ....
Rate: [mm/min]	Rate: [mm/min] ....
--	--
Start:	Start: ....
Ende:	Ende: ....
Δ:	Δ: ....
Rate: [mm/min]	Rate: [mm/min] ....
--	--
Start:	Start: ....
Ende:	Ende: ....
Δ:	Δ: ....
Rate: [mm/min]	Rate: [mm/min] ....
--	--
Rate [mm/h]	Rate [mm/h] ....

Interpretation der Messergebnisse:

6 Abundanz und Masse der Regenwürmer (Fluchtversuch)

6.1 Einleitung

Regenwürmer gehören von der Zahl her zu den seltenen Bodentieren. Ihre Masse ist allerdings in der Summe beachtlich und ihre Leistungen für das Bodengefüge und den Umsatz der organischen Substanz sind herausragend. Regenwürmer erfüllen zwei wichtige Aufgaben:

1. Sie schaffen große kontinuierliche Bodenporen
2. Sie befördern die Vegetationsrückstände von der Bodenoberfläche in tiefere Bodenschichten, wo sie zerkleinert und im Verdauungstrakt der Tiere intensiv mit den Mineralpartikeln vermischt werden.

Die Zahl und die Menge der Regenwürmer auf einem Standort ist ein wichtiger Indikator für die Bodenqualität.

6.2 Prinzip der Methode

Zur Begrenzung der Untersuchungsfläche wird mit einem Zollstock eine Fläche von 40 x 40 cm (= 0,16 m^2) gekennzeichnet. Die Regenwürmer aus der Krume werden mit der Hand ausgelesen und die tiefgrabenden Würmer ein Reizmittel (Allyl-Iso-Thiocyanat) an die Bodenoberfläche getrieben, um sie dort aufzusammeln.

6.3 Durchführung

- **Fläche mit einem Zollstock begrenzen** (40 x 40 cm)
- **Krume (30 cm)** ausheben und die **Regenwürmer** per Hand **heraussammeln**
- **Extraktionsmittel** (0,8 ml Allyl-Iso-Thiocyanat in 16 ml Methanol, im Labor vorbereitet) auf dem Feld in 10 l Wasser verdünnen. Zugabe von zunächst ca. 3 Liter (bis der Boden leicht überstaut ist).
- **Abdeckung** über den Ring legen und ca. 15 min warten.
- **Absammeln** der Regenwürmer und in feuchtem Behälter mit etwas Boden möglichst kühl aufbewahren
- Vorgang so oft wiederholen, bis keine weiteren Regenwürmer mehr an der Oberfläche erscheinen (meist ist zweimalige Wiederholung ausreichend).

6.4 Darstellung und Bewertung

Für die Auswertung und Darstellung gibt es unterschiedliche Möglichkeiten:

1. Auszählen der Tiere = Abundanz
2. Aufteilung der Regenwürmer nach Jungtieren und geschlechtsreifen Tieren
3. Unterscheidung verschiedener Arten oder Ökogruppen (endogäisch, anezisch, epigäisch)
4. Auswiegen oder Auslitern der Würmer - eventuell nach Arten getrennt
5. Umrechnung der Ergebnisse auf m^2 (Faktor 6,25) bzw. je ha (Faktor 62.500)

Im Praktikum trennen nach:
adulte Tiefgräber, adulte Endogäische, juvenile Tiefgräber, juvenile Endogäische
Die zu erwartende Anzahl an Regenwürmern ist sehr unterschiedlich und hängt von zahlreichen Faktoren ab (z.B. pH-Wert, Humusgehalt, Jahreszeit, Nutzung). Für Mittel- und Nordeuropäische Böden sind im Mittel 100 Individuen je m^2 (Acker ca. 50, Grünland ca. 200 Tiere/m^2) und eine Masse von 30g/m^2 zu erwarten (Scheffer/Schachtschabel (1998). Sehr hohe Werte sind demnach 500 Tiere/m^2 und eine Masse von 200 g/m^2.

6.5 Fehler

Regenwürmer können sich schnell in ihren Röhren bewegen. Es ist daher sehr schwierig, alle Tiere zu erreichen, gleichgültig mit welcher Methode gearbeitet wird. Es kann nie ausgeschlossen werden, dass insbesondere die Tiefgräber in den Unterboden flüchten, anstatt an die Oberfläche zu kommen. Eine weitere Schwäche der Methode besteht darin, dass die ausgetriebenen Tiere zum Teil auch außerhalb der abgegrenzten Fläche aus dem Boden kommen. Eine größere Fläche abzugrenzen, vermindert diesen Fehler, vermehrt aber die auszulesende Bodenmenge enorm.

6.6 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.	Datum:

Standort der Messung, Beschaffenheit der Bodenoberfläche, Feuchtigkeitszustand, Witterung

Messergebnis:	Messergebnis:
Anzahl Tiere ....,	Anzahl Tiere ....,
Tiere/m^2	Tiere/m^2 ....
Masse [g]	Masse [g] ....
Masse [kg/ha]	Masse [kg/ha] ....

Interpretation der Messergebnisse:

7 Gefügebeurteilung im Feld (Spatendiagnose nach Dietz und Weigelt)

7.1 Einleitung

Gegenstand der Gefügeuntersuchung ist der Wurzelraum. Deshalb muss man den Boden aufgraben. Das wichtigste Hilfsmittel dazu ist ein Spaten. Beobachtet werden:

- Eindringwiderstand
- Zerfall eines Bodenblocks beim Abwerfen oder bei leichtem Druck mit der Hand
- direkte und indirekte Gefügemerkmale
- Gefügeveränderungen nach der Tiefe am Bodenprofil

7.2 Durchführung

7.2.1 Bodenblockausstechen

- Einstechen des Spatens: Der Eindringwiderstand lässt bereits auf die Dichtlagerung schließen.
- Der Auswurf des Spatenstichs gibt einen ersten Hinweis auf die Gefügeform.
- Der auszuhebende Bodenblock wird durch seitliches Einstechen abgegrenzt.
- Ausheben des Bodenblocks: Die eine Hand betätigt den Spaten als Hebel, die andere hält den Bodenblock auf dem Spatenblatt.
- Vorsichtiges Zerlegen des Bodenblocks mit den Händen oder einem Taschenmesser.

7.2.2 Abwurfprobe

Beim Aufprall auf eine feste Unterlage (Brett) zerfällt der Bodenblock in seine natürlichen Gefüge-aggregate.

7.2.3 Zerlegen mit der Hand

- Beim behutsamen Zerteilen werden Gefügeform, Farbe und Wurzelbild registriert.
- Durch Zerdrücken mit der Hand werden Festigkeit und Zerfall der gröberen Aggregate geprüft.

7.2.4 Beobachtungen am Bodenprofil

- Freilegung der Bestellschicht: Sie gibt Auskunft über den Bodenschluss und eine eventuelle Oberflächenverschlämmung.
- Freilegung der Krume: Mit einem Taschenmesser werden der Übergang von Ober- zu Unter-krume, Verdichtungen, organische Reste u.a. sondiert.
- Freilegen der Pflugsohle und des tieferen Unterbodens durch stufenweises Tiefergraben: durch vorsichtiges Auskehren wird nach Röhren und Klüften gesucht.
- Ausstechen eines Bodenblocks im Bereich der Pflugsohle: Ist eine verdichtete, verlassene Kru-menschicht erkennbar?
- Aufbrechen des Bodenblocks mit den Händen: Der notwendige Kraftaufwand entspricht der Dichtlagerung.

7.3 Bewertung

Ein Schema zur Bewertung ist in der Anlage beigefügt.

7.4 Fehler

Erfahrene Kartierer können über die Spatendiagnose mit mindestens ebenso hoher Sicherheit Gefü-geschäden aufspüren, wie andere durch aufwendige Sondierungen.

7.5 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.:	Datum:

Standort der Messung, Beschaffenheit der Bodenoberfläche, Feuchtigkeitszustand, Witterung

1. Bodenoberfläche

Merkmale:

2. Krume und Unterboden

Gefügeform

3. Sonstige Merkmale

Wurzeln (Durchwurzelung)

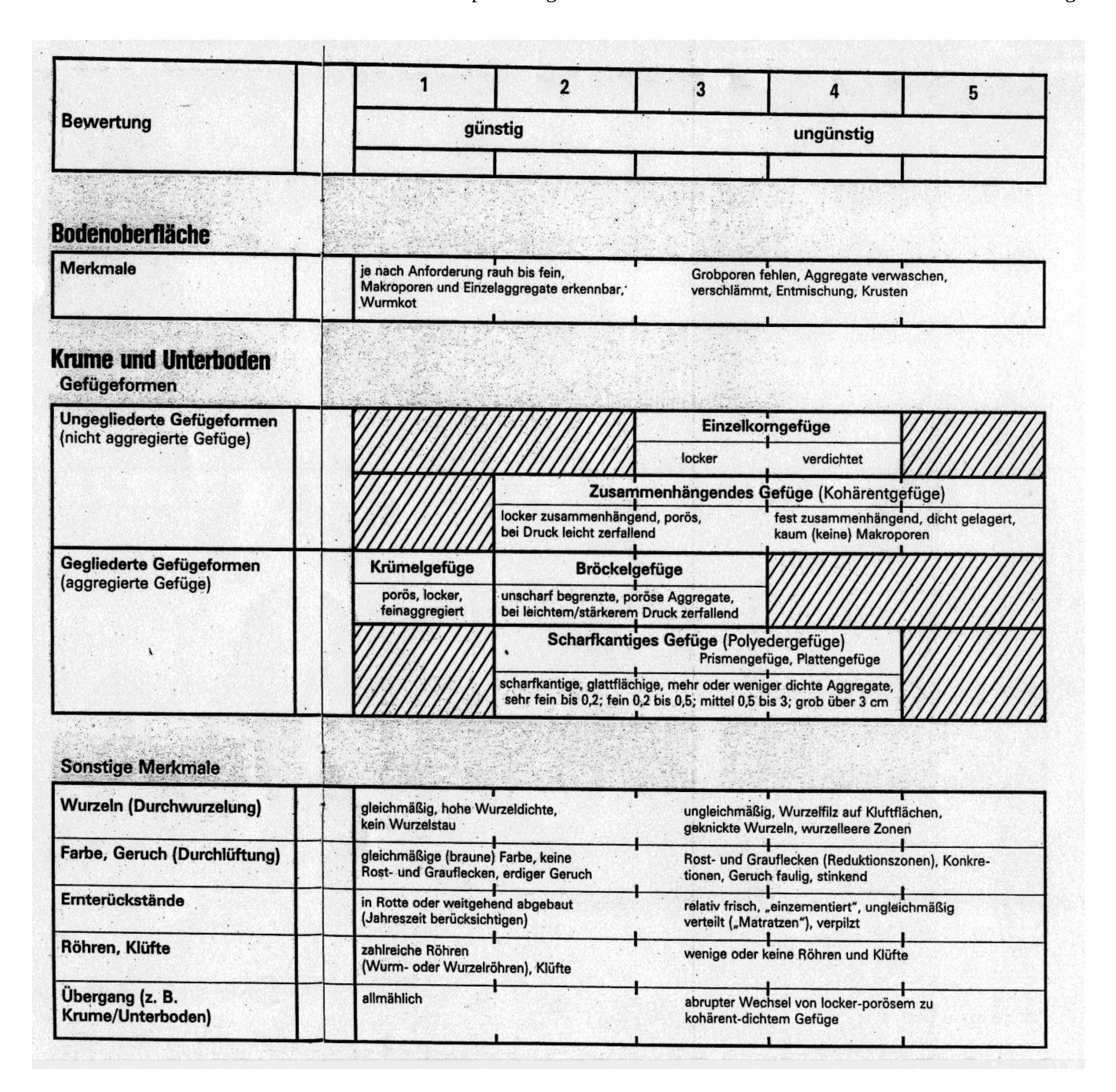
Farbe, Geruch (Durchlüftung)

Ernterückstände

Röhren, Klüfte

Übergang (z.B. Krume/Unterboden)

Interpretation der Messergebnisse:



Bewertung	1	2	3	4	5
	günstig			ungünstig	

Bodenoberfläche

	1	2	3	4	5
Merkmale	je nach Anforderung rauh bis fein, Makroporen und Einzelaggregate erkennbar, Wurmkot		Grobporen fehlen, Aggregate verwaschen, verschlämmt, Entmischung, Krusten		

Krume und Unterboden

Gefügeformen

	1	2	3	4	5
Ungegliederte Gefügeformen (nicht aggregierte Gefüge)			Einzelkorngefüge: locker	verdichtet	
		Zusammenhängendes Gefüge (Kohärentgefüge): locker zusammenhängend, porös, bei Druck leicht zerfallend		fest zusammenhängend, dicht gelagert, kaum (keine) Makroporen	
Gegliederte Gefügeformen (aggregierte Gefüge)	Krümelgefüge: porös, locker, feinaggregiert	Bröckelgefüge: unscharf begrenzte, poröse Aggregate, bei leichtem/stärkerem Druck zerfallend			
		Scharfkantiges Gefüge (Polyedergefüge) Prismengefüge, Plattengefüge: scharfkantige, glattflächige, mehr oder weniger dichte Aggregate, sehr fein bis 0,2; fein 0,2 bis 0,5; mittel 0,5 bis 3; grob über 3 cm			

Sonstige Merkmale

	1	2	3	4	5
Wurzeln (Durchwurzelung)	gleichmäßig, hohe Wurzeldichte, kein Wurzelstau		ungleichmäßig, Wurzelfilz auf Kluftflächen, geknickte Wurzeln, wurzelleere Zonen		
Farbe, Geruch (Durchlüftung)	gleichmäßige (braune) Farbe, keine Rost- und Grauflecken, erdiger Geruch		Rost- und Grauflecken (Reduktionszonen), Konkretionen, Geruch faulig, stinkend		
Ernterückstände	in Rotte oder weitgehend abgebaut (Jahreszeit berücksichtigen)		relativ frisch, „einzementiert", ungleichmäßig verteilt („Matratzen"), verpilzt		
Röhren, Klüfte	zahlreiche Röhren (Wurm- oder Wurzelröhren), Klüfte		wenige oder keine Röhren und Klüfte		
Übergang (z. B. Krume/Unterboden)	allmählich		abrupter Wechsel von locker-porösem zu kohärent-dichtem Gefüge		

Im Downloadbereich der Vorlesungsunterlagen gibt es für die „Spatendiagnose" eine ausführliche und reich bebilderte Broschüre der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft als pdf-Datei.

Bodenkunde-Praktikum Spatendiagnose Anlage

Schema zur Gefügebeurteilung im Feld

Die Gefügebeurteilung im Feld erfolgt nach Merkmalen, die man sehen, fühlen, gelegentlich auch riechen kann. Dazu gehören: Gefügeform, Wurzelbild, Farbe, Geruch, Ernterückstände, Grobporen und Übergänge, Eindringwiderstand und Zusammenhalt des Gefüges.

Entscheidend für die Beurteilung ist, ob die beobachtbaren Merkmale für das Gedeihen der Pflanzen günstig oder ungünstig sind. Günstige Merkmale erhalten die Note 1 oder 2 und stehen im Beurteilungsschema links, ungünstige Merkmale werden mit 4 oder 5 bewertet und stehen im Beurteilungsschema auf der rechten Seite. Besondere Bedeutung besitzt die *Beschaffenheit der Bodenoberfläche*. Deshalb ist sie stets gesondert zu bewerten.

Das wichtigste Merkmal für die Beurteilung von *Krume und Unterboden* ist die *Gefügeform*. Es werden zwei nicht aggregierte und fünf aggregierte Gefügeformen unterschieden. „Aggregiert" heißt, die winzigen, mit bloßem Auge nicht sichtbaren Bodenteilchen haben sich zu größeren, abgrenzbaren Formtypen zusammengeschlossen (Krümel, Bröckel, Polyeder, Prismen, Platten).

Günstig ist ein Gefügezustand, der den Pflanzen eine durchgehend leichte Durchwurzelbarkeit gestattet, bei dem ein guter Saataufgang, eine hohe Infiltration und ein optimales Wasserdargebot gewährleistet sind. Diese Anforderungen an das Bodengefüge sind um so weniger erfüllt, je dichter die Bodenteilchen lagern oder je größer und dichter die Aggregate sind. Dementsprechend steht das poröse, lockere, feinaggregierte *Krümelgefüge* unter 1 (sehr günstig), das dichte, grobe *Polyedergefüge* unter 4 (ungünstig). Bei den stark ausgeprägten polyedrischen Gefügen kommt es wesentlich auf die Größe der Gefügeelemente an. Ein feinpolyedrisches Gefüge, wie es frostgaren, tonigen Böden eigen ist, erhält die Bewertungsziffer 2 (günstig). Bei Prismen- und Plattengefügen entscheidet die Aggregatgröße, ob sie unter 3 oder 4 einzuordnen sind.

Das *Bröckelgefüge* steht zwischen Krümel- und Polyedergefüge und wird je nach Größe und Druck, bei dem es zerfällt, entweder mit 2 oder 3 beurteilt.

Das *Kohärentgefüge* kann sowohl locker und porös und für Pflanzen dementsprechend günstig sein (ein Beispiel dafür ist der anstehende Löß) oder völlig dicht sein (Beispiel: zu naß befahrener Boden in der Reifenspur). Die Spannweite des kohärenten Gefüges reicht deshalb von 2 (günstig) bis 5 (sehr ungünstig).

Das *Einzelkorngefüge* ist das Gefüge der Sandböden. Wegen seiner geringen Wasserhaltefähigkeit ist es nur „mittel", bei stärkerer Verdichtung „ungünstig" zu beurteilen.

Erfolgt die Gefügebeurteilung unter einem wachsenden Bestand, so geben die *Wurzeln*, insbesondere die Wurzeldichte, ihre Verteilung über das Bodenvolumen und der Wurzelverlauf am besten Auskunft, ob das Gefüge in Ordnung ist oder nicht.

Farbe und Geruch lassen auf den Wasserhaushalt und die Durchlüftung schließen. Die eindeutigsten Merkmale für pflanzenschädigende Gefügestörungen sind Reduktionszonen und stinkender Geruch.

An der Verteilung der (eingearbeiteten) *Ernterückstände* und ihrem Rottegrad (abhängig von der Jahreszeit) kann man Bearbeitungsfehler leicht erkennen.

Vertikal durchgehende *Röhren* (Wurm- und Wurzelröhren) und *Klüfte* sind Anzeiger für eine gute Wasserleitfähigkeit, Durchlüftung und Durchwurzelbarkeit.

Das Bodengefüge ändert sich von der Oberfläche zum Unterboden zwangsläufig, schon allein wegen der unterschiedlichen Auflast. Günstig ist es, wenn der *Übergang* allmählich erfolgt. Dagegen ist jeder abrupte Wechsel, weil Ursache für Wasserstau und gestörte kapillare Wassernachlieferung, ungünstig.

8 Wassergehalt

8.1 Einleitung

Der Wassergehalt im Boden kann auf verschiedene Weise bestimmt werden. Die gravimetrische Bestimmung des Wassergehaltes ist präzise und im Labor einfach durchzuführen. Diese Methode ist deshalb die Referenz für andere Verfahren der Wassergehaltsbestimmung, wie zum Beispiel die TDR-Messung (Time-Domain-Reflektometrie) oder NIRS (Nah-Infra-Rot-Spektroskopie). Ein Nachteil an der gravimetrischen Bestimmung des Wassergehaltes besteht darin, dass die Probe anschließend (nach der Trocknung) in einem veränderten Zustand vorliegt. Außerdem dauert die Methode relativ lange. Die Ergebnisse liegen erst nach mehreren Stunden Trocknung vor.
Die Bestimmung des Wassergehaltes (bzw. des Trockensubstanzanteils) ist im Labor häufig erforderlich, da die Messwerte bodenphysikalischer und bodenchemischer Untersuchungen in der Regel auf den trockenen Boden bezogen werden. Wenn also eine feuchte Bodenprobe untersucht wird, ist parallel dazu der Wassergehalt eines Aliquots der Probe zu bestimmen, um später die Messwerte auf die Bodentrockensubstanz beziehen zu können.

8.2 Prinzip der Messung

Das Prinzip der Bestimmung des gravimetrischen Wassergehalts besteht darin, dass eine bestimmte Bodenmenge im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wird und der trocknungsbedingte Massenverlust der Probe interpretiert wird als das im Verlauf der Trocknung verdunstete, ursprünglich in der Probe vorhandene Wasser.

8.3 Durchführung

8.3.1 Vorgehensweise

- Tara des Gefäßes bestimmen (Gefäß, z.B. Aluschälchen, ohne Boden wiegen): **Tara** = ***a*** [g]
- Einwaage der Bodenprobe bzw. eines Aliquots der Probe (20 bis 30 g Bodeneinwaage reichen beim Feinboden aus):
  Brutto-Einwaage = Tara + feuchter Boden = ***b*** [g]
- Platzieren des Aluschälchens mit dem eingewogenen Boden im Trockenschrank und über Nacht **Trocknen bei 105 °C**
- Abkühlen lassen in einem Exsikkator, damit der Boden möglichst nicht erneut Feuchtigkeit aus der Luft aufnimmt.
- Nach dem Abkühlen das Aluschälchen mit dem getrockneten Boden zurückwiegen:
  Brutto-Rückwaage = Tara + trockener Boden = ***c*** [g]

8.3.2 Auswertung

Berechnung des Wassergehalts in Gewichtsprozent (H_2O%): $H_2O\,\% = \frac{b-c}{b-a} \cdot 100$

Berechnung des Trockensubstanzanteils in Gewichtsprozent (TS%): $TS\,\% = \left(1 - \frac{b-c}{b-a}\right) \cdot 100$

8.4 Fehler

Bei der gravimetrischen Bestimmung des Wassergehaltes treten selten Fehler auf.

- Bei Probeneinwaagen von bis zu 50 g ist Gewichtskonstanz (= vollständige Trocknung) nach 12 Stunden bei 105 °C sicher erreicht und braucht nicht überprüft zu werden.
- Bodentiere (z.B. Regenwürmer) und andere organische Substanz (z.B. Wurzeln) werden bei dem Vorgang ebenfalls getrocknet und der Masseverlust als Bodenwasser interpretiert.

- Vielfach wird in der bodenkundlichen Literatur als „gravimetrischer Wassergehalt“ (WG) auch das Verhältnis von Wasser zu Boden-Trockenmasse bezeichnet. Häufig wird der Quotient dann mit 100 multipliziert und dann auch noch (fälschlicherweise) als %-Wert (WG%) bezeichnet. WG% steht dann für das Bodenwasser bezogen auf 100 g Bodentrockensubstanz:

  $$WG\,\% = \frac{b-c}{c-a} \cdot 100$$

  Die Angaben WG%, TS% und H_2O% lassen sich leicht ineinander umrechnen:

  $$TS\,\% = \frac{100}{WG\% + 100} \cdot 100$$

  sowie

  $H_2O\% = 100 - TS\%$

- Für das Abkühlen sind bei großen Bodenmengen oft nicht genügend Exsikkatoren verfügbar. Die Wiederbefreuchtung des getrockneten Bodens durch Wasserdampf aus der Raumluft lässt sich auch dadurch verringern, dass die Bodenproben im Trockenschrank verbleiben, wobei der Trockenschrank (möglichst mit geschlossener Lüftungsklappe) mit verschlossener Tür langsam abkühlt. Die Wiederbefreuchtung spielt vor allem bei tonhaltigem Material eine Rolle. Wenn die Bodenmasse im Vergleich zur Gefäßmasse sehr klein ist, kann auch die Wiederbefreuchtung der Gefäßoberfläche durch die Raumluft eine bedeutsame Fehlerquelle darstellen (z.B. bei der Bestimmung der Tonfraktion im Rahmen der Texturbestimmung).
- Wenn der Wassergehalt (bzw. der Trockensubstanzanteil) an einem Aliquot bestimmt wird, um später das Ergebnis einer bodenphysikalischen oder bodenchemischen Untersuchung auf die Bodentrockenmasse beziehen zu können, dann muss unbedingt darauf geachtet werden, dass die Einwaagen für die Wassergehaltsbestimmung und die für die eigentliche Bodenuntersuchung gleichzeitig erfolgen, damit in beiden Einwaagen der gleichen Wassergehalt existiert.

8.5 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.:	Datum:

Herkunft der Bodenprobe (Standort/Schlagbezeichnung): …………………………………………..

Naturräumliche Zuordnung des Standortes: ………………………………………………………

Entnahmetiefe (cm von ……… bis ………………)

Nutzung: ……………………………………………

Feinboden:	
Tara (Aluschälchen)	a .... [g]
Brutto-Einwaage vor der Trocknung	b .... [g] (brutto heißt: Tara + Boden)
– Brutto-Rückwaage nach Trocknung	c .... [g] (brutto heißt: Tara + Boden)
trocknungsbedingter H_2O-Verlust	b-c .... [g]
Netto-Rückwaage	c-a .... [g]
Netto-Einwaage	b-a .... [g]

$$H_2O\,\% = \frac{b-c}{b-a} \cdot 100 =$$ ....%

$$TS\,\% = \left(1 - \frac{b-c}{b-a}\right) \cdot 100 =$$ ....%

$$WG\,\% = \frac{b-c}{c-a} \cdot 100 =$$ ....g /100 g

9 Körnungsanalyse

9.1 Einleitung

Die Bodenart ergibt sich aus der Verteilung der mineralischen Bestandteile des Bodens auf die unterschiedlichen Korngrößenklassen. Die Bodenart beeinflusst maßgeblich die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften eines Bodens. Bei Kenntnis alleine der Bodenart kann man deshalb recht gute Näherungswerte schätzen, z.B. für den Wasser- und Lufthaushalt, plastische Eigenschaften, die Quellbarkeit, die Austauschkapazität und die Nährstoffgehalte.
Bei der Körnungsanalyse gibt es grundsätzlich drei Probleme:

1) Die festen Bodenpartikel sind nicht rund, sondern haben unterschiedliche Formen. Aus diesem Grund wird statt eines tatsächlichen Durchmessers nur ein so genannter **Äquivalenzdurchmesser** bestimmt.
2) Die Spanne an Korngrößen im Boden ist sehr weit. Deshalb müssen **unterschiedliche Methoden** verwendet werden.
3) Die Primärteilchen liegen im Boden zu Aggregaten verklebt vor. Vor der eigentlichen Körnungsanalyse muss deshalb die Kittsubstanz zerstört und die Aggregate aufgelöst werden (⇒ **Vorbehandlung**). Hierbei ist es unvermeidlich, dass auch Primärteilchen in kleinere Fragmente aufgeteilt werden. Das Ergebnis der Körnungsanalyse (insbesondere der Tonanteil) hängt entscheidend von der Art der Vorbehandlung ab. Die Vorbehandlung besteht in der Regel darin, Ton-Humuskomplexe mittels H_2O_2 zu zerstören und aggregierte Tonpartikel durch die Behandlung mit Natrium-Pyrophosphat zu dispergieren.

Ungeeignet für die Korngrößenanalyse sind Bodenproben, die im Ofen bei 105 °C getrocknet wurden. Bei dieser hohen Temperatur lagern sich Tonpartikel irreversibel zu kleinen Aggregaten zusammen. Deshalb wird für die Korngrößenanalyse „feldfeuchter“ bzw „lufttrockener“ Boden verwendet. Der Unterschied im Wassergehalt zwischen feldfeuchten bzw. lufttrockenen und ofentrockenen Proben wird dann später rechnerisch korrigiert. Zu diesem Zweck wird parallel zur eigentlichen Körnungsanalyse auch der Wassergehalt in einem Aliquot gravimetrisch bestimmt (Kapitel 3, Seite 8).
Rechnerisch korrigiert werden muss außerdem die mit einer ggf. vorgenommenen Humuszerstörung einhergehende Gewichtsabnahme der Probe. Hierzu wird der Humusgehalt geschätzt oder in einer Parallelprobe gemessen und die ursprüngliche Einwaage (E_A) entsprechend nachfolgender Formel zur „**berichtigten Einwaage**“ (E_{ber}) korrigiert:

$$E_{ber} = \frac{E_A}{100} \cdot (100 \;-\; \text{org. Substanz\%} \;-\; H_2O\%)$$

Rechnerisch zu korrigieren ist darüber hinaus auch die Zugabe des Natrium-Pyrophosphats (Salzkorrektur).

9.2 Prinzip der Methode

Die feldfeuchte bzw. lufttrockene Bodenprobe (Feinboden < 2 mm) wird zunächst der **Vorbehandlung** unterzogen, um die Primärpartikel zu vereinzeln (Humuszerstörung mit H_2O_2, Dispergierung mit Natrium-Pyrophosphat). Anmerkung: Auf die Humuszerstörung kann bei Mineralböden mit geringem Humusgehalt (< 4%) verzichtet werden.
Die vorbehandelte Bodenprobe wird dann mit Wasser durch ein **Sieb mit 63 µm** Maschenweite gespült.
Der **Siebüberstand** (**= Sand**) wird in einen Tiegel gespült und die Masse der Sandfraktion durch Trocknen bei 105 °C gravimetrisch bestimmt. Anmerkung: Mit einem Sieb von µm Maschenweite kann auch die Grob-Schlufffraktion abgetrennt werden, im Praktikum wird hierauf aber verzichtet.
Der **Siebdurchgang** (= **Schluff und Ton**) wird in einen **Standzylinder** gespült und dort in 1000 ml Wasser suspendiert.

Ton und Schluff sedimentieren in dem Zylinder unterschiedlich schnell. Diese Eigenschaft wird für die Trennung der beiden Fraktionen genutzt. Nach einer bestimmten Zeit werden mit einer **Köhn-Pipette** aus einer bestimmten Tiefe 10 ml der Suspension aus der Grenzschicht entnommen, die gerade keine Partikel der Schlufffraktion beinhaltet.
Die 10 ml Suspension wird in ein Wägegläschen überführt und die Masse des darin suspendierten **Tons** gravimetrisch nach Trocknung bei 105 °C bestimmt. Das entspricht dann einem Hundertstel des Tons in der gesamten Suspension.
Der **Schluff**anteil wird **rechnerisch** als Residualwert (Einwaage – Sand – Ton) ermittelt.

9.3 Durchführung

9.3.1 Wägungen

1.) <u>Für das Sieben und Schlämmen:</u>
   a) **12,0 g** feldfeuchten bzw. **10,0 g** lufttrockenen **Feinboden** (< 2 mm gesiebt) **in 600 ml Bechergläser**[6] einwiegen. Das ist die so genannte „Arbeitseinwaage" (E_A). Als Bezugsgröße für die Messungen der Körnungsanalyse dient dann später die berichtigte Einwaage (E_{ber}). Das ist die Arbeitseinwaage korrigiert um den Wasser- und den Humusgehalt
   b) **Tara Prozellantiegel** für Sandfraktion
   c) **Tara Wägegläschen** für Tonfraktion (mit Deckel möglichst genau wiegen, Waage merken!)
2.) <u>Für das Bestimmen des Wassergehalts in einem Aliquot siehe Kapitel 8, Seite 31:</u>

9.3.2 Vorbehandlung [7)]

9.3.2.1 Humuszerstörung (bei Mineralböden mit geringem Humusgehalt (< 4 %) kann auf die Humuszerstörung verzichtet werden)

Der Boden wird mit 40 ml 30%iger H_2O_2 versetzt (Abzug! Spezial-Pipette benutzen!). Wasserstoffperoxid wirkt stark oxidierend auf die organische Substanz, die dabei zu CO_2 umgesetzt wird (Schaumbildung). Nach dem ersten Schäumen wird die Suspension unter dem Abzug im 70 °C heißen Wasserbad für ca. 15 bis 20 Minuten erhitzt. Sobald kein CO_2 mehr freigesetzt wird, ist die organische Substanz im Wesentlichen zerstört.

9.3.2.2 Dispergierung

Mit einer Vollpipette wird 25 ml 0,1 *M* Na-Pyrophosphat ($Na_4P_2O_7 \cdot 10\ H_2O$) in das Becherglas gegeben. Die Suspension wird in eine Glasflasche überführt, auf ca. 200 ml mit Destwasser aufgefüllt und 24 h lang in einem Schüttler geschüttelt. Der Na-Überschuss bewirkt die Dispergierung der Tonpartikel.

9.3.3 Sieben

Die Bodensuspension wird mit Destwasser (= deionisiertes Wasser) über ein Sieb mit der Maschenweite von 63 µm in einen 1000 ml fassenden Messzylinder (= Sedimentierzylinder) gespült (Trichter verwenden!). Der Siebrückstand enthält die Sandfraktion, Größenklasse 2000 bis 63 µm. Der Siebrückstand wird mit Destwasser in einen zuvor gewogenen Porzellantiegel gespült und das Gewicht des Sandes nach Trocknung bei 105 °C bestimmt:

$$\text{Sand [g]} = \text{Masse brutto [g]} - \text{Tara Porzellantiegel [g]}.$$

Die Trocknung erfolgt über Nacht im Trockenschrank. Eventuell ist es erforderlich, dass vor der Trocknung überschüssiges Wasser vorsichtig dekantiert wird. Der Sandanteil in % berechnet sich dann wie folgt:

$$\text{Sand \%} = \text{Sand [g]} / E_{ber}\,\text{[g]} \times 100.$$

9.3.4 Sedimentieren (Pipettanalyse nach KÖHN)

9.3.4.1 Prinzip der Methode

Der Ton (Partikel mit Äquivalenzdurchmesser < 2 µm) wird vom Schluff (= Partikel zwischen 63 µm und 2 µm Äquivalenzdurchmesser) durch die unterschiedliche Sedimentiergeschwindigkeit der

---

[6] 600 ml Becherglas verwenden, wenn die Humuszerstörung durchgeführt werden soll.
[7] Im Praktikum weicht die Vorbehandlung und das Sedimentieren aus Zeitgründen von der DIN 19683 ab.

Fraktionen getrennt. Partikel sinken in einer Flüssigkeit um so langsamer ab, je kleiner sie sind. Für kugelförmige Partikel wird die Sinkgeschwindigkeit *v* (cm s^{-1}) durch die Stokessche Formel beschrieben:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\delta_K - \delta_F)}{\eta} \cdot r^2 \cdot g$$

Hierbei ist δ_K die Dichte der Körner (g cm^{-3}), δ_F die Dichte der Flüssigkeit (g cm^{-3}), *r* der Radius der Körner (cm), *g* die Erdbeschleunigung (981 cm s^{-2}), η die Viskosität (g cm^{-1} s^{-1}). Die Zahlen 9 und 2 ergeben sich bei der Herleitung der Gleichung aus der Kraft, die das Sinken verursacht und dem Widerstand, den das Medium leistet. Bei 20 °C ist die Dichte des Wassers = 1 und die Viskosität = 0,01 in den genannten Einheiten. Für die Dichte der Körner kann die von Quarz (2,65 g cm^{-3}) angenommen werden. Dichte und Viskosität sind abhängig von der Temperatur, weshalb das Sedimentieren nach Möglichkeit in einem konstant temperierten Wasserbad erfolgen sollte. In 20 °C warmem Wasser sinken Quarzkugeln mit einem Radius von 0,0001 cm mit:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{(2{,}65 - 1)}{0{,}01} \cdot 10^{-8} \cdot 981 = 3{,}597 \cdot 10^{-4} [cm\, s^{-1}]$$

Aus der Sinkgeschwindigkeit *v* kann für eine bestimmte Dauer der Sedimentation *t* die Sinkstrecke *h* berechnet werden ($h = v \times t$). Im Verlauf von 4 Stunden (= 14400 sec) wären Quarzkugeln mit einem Durchmesser von 2 µm (Grenze Ton-Schluff) also die Strecke *h* abgesunken.

$$h = 3{,}597 \cdot 10^{-4} [\mathrm{cm\, s^{-1}}] \cdot 14400 [\mathrm{s}] = 5{,}18 [\mathrm{cm}]$$

Das entspricht einer Sinkgeschwindigkeit von 0,0216 cm min^{-1}. Bei anderen Temperaturen ergeben sich für Quarzkugeln von 2 µm Durchmesser folgende Sinkgeschwindigkeiten:

C°	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
cm min^{-1}	0,0194	0,0200	0,0204	0,0210	0,0216	0,0220	0,0226	0,0231	0,0236	0,0242

9.3.4.2 Arbeitsanweisung

- **Schütteln:** Die Sedimentierzylinder mit der Bodensuspension (enthalten Schluff und Ton) werden mit Destwasser auf 1000 ml aufgefüllt, geschüttelt und dann vorsichtig auf dem Labortisch oder falls vorhanden im Wasserbad platziert.
  Anmerkung: Meist werden ganze Serien von Proben untersucht. In dem Fall ist es sinnvoll, die Standzylinder zum Sedimentieren im Abstand von 2 Minuten abzustellen. Dadurch wird erreicht, dass die Entnahme mit der Köhnpipette später ebenfalls im Zweiminutentakt und stets aus der gleichen Tiefe erfolgen kann. Dieses Vorgehen empfiehlt sich auch im Praktikum.
- **Berechnen der Entnahme Tiefe:** Sedimentationszeit x Sinkgeschwindigkeit (Tabelle oben).
- **Pipettieren:** Aus der errechneten Tiefe mit Hilfe einer KÖHN-Pipette 10 ml Bodensuspension entnehmen und in ein Wägegläschen überführen (Tara der Gläschen vorher auf 0,1 mg genau bestimmen!). Die Suspension enthält oberhalb der errechneten Tiefe nur noch Ton, denn auch die kleinsten Partikel der Schlufffraktion haben zum Zeitpunkt der Entnahme errechnete Tiefe gerade passiert.
- **Trocknen:** Die Wägegläschen mit dem Ton werden in den Trockenschrank gestellt (Schliffdeckel offen) und bei 105 °C über Nacht getrocknet.
- **Abkühlen:** Am nächsten Morgen werden die Gläschen aus dem Trockenschrank genommen (Zange benutzen!) und zum Abkühlen (Schliffdeckel offen!) in einen Exsikkator gestellt.
- **Wiegen:** Nach dem Abkühlen wird der Schliffdeckel verschlossen, damit die Proben nicht erneut Feuchtigkeit ziehen. Die Wägegläschen mit dem Ton werden auf 0,1 mg genau gewogen.

- **Berechnen:** Der Tongehalt in 10 ml Suspension ergibt sich aus der Differenz zwischen der Bruttomasse der Wägegläschen und deren Tara-Masse. Darüber hinaus muss auch noch 6,65 mg für das Gewicht des Na-Pyrophosphates (Salzkorrektur) abgezogen werden:

$$\text{Ton [g]} = \text{Masse brutto [g]} - \text{Tara der Gläschen [g]} - 6{,}65\ 10^{-3}\ \text{[g]}$$

$$\text{Ton \%} = \frac{\text{Ton[g]}}{E_{\text{ber}}\text{[g]}} \cdot 100$$

$$\text{Schluff \%} = 100 - \text{Ton \%} - \text{Sand \%}.$$

9.4 Darstellung

Die Körnungsanalyse liefert, wenn sie vollständig mit den Unterfraktionen durchgeführt wird, eine Reihe von Zahlen, die am besten in Form einer Verteilung dargestellt werden. Hierzu eignen sich Summenkurven, Blockdiagramme (als Approximation einer Häufigkeitsverteilung) oder Dreiecksdiagramme.
Bei der **Summenkurve** bezeichnet die x-Achse die Korngrößen und die y-Achse die jeweiligen %-Anteile an der Gesamtprobe (= 100 %). Wurde Feinboden untersucht, dann ist 2000 μm der höchste Wert der x-Achse. Man beginnt bei der Eintragung mit der Untergrenze der gröbsten erhaltenen Fraktion. Die Subtraktion des Anteils von 100 gibt den y-Achsenwert. Der x-Achsenwert ist die untere Grenze der Größenklasse. Nacheinander werden dann die Anteile der nächst feineren Fraktionen von dem verbleibenden Rest abgezogen und als Punkte eingetragen. Zum Schluß werden die Punkte miteinander verbunden. Es ergibt sich dann oft ein S-förmiger Kurvenverlauf (siehe Abbildung im Protokoll).
Beim **Blockdiagramm** werden die Anteile der Korngrößenklassen als Blöcke nebeneinander dargestellt. Dies entspricht im Prinzip einer Häufigkeitsverteilung.
Das **Dreiecksdiagramm** eignet sich zur Darstellung besonders, wenn die drei Hauptfraktionen (Sand, Schluff, Ton) ohne Unterfraktionen bestimmt wurden.

9.5 Fehler

Das Sieben ist am genauesten für Partikel bis 63 μm (s ≈ ± 1,5 %). Die Sedimentation ist besonders geeignet für Partikel von 20 bis 2 μm (s ≈ ± 1,5 %). Wegen der sehr kurzen Sedimentationszeit der Grobschlufffraktion ist diese Korngrößenklasse weniger präzise zu bestimmen (s ≈ ± 6 %). In manchen Labors wird diese Fraktion auch durch Siebung ermittelt. Bei der Tonfraktion ist vor allem bei geringen Tongehalten der Wägefehler relevant. Er kann dadurch verringert werden, dass bei Böden mit geringem Tongehalt eine höhere Bodeneinwaage (z.B. 20 g Arbeitseinwaage) verwendet wird. Für die Unterteilung der Tonfraktion in Unterfraktionen ist wegen der ansonsten sehr langen Sedimentationszeiten die Fliehkraftsedimentation zu empfehlen. Wenn die Schlufffraktion aus der Differenz zwischen Sand- und Tonanteil berechnet wird, dann beinhaltet der Wert die Analysenfehler beider Ausgangsfraktion und eine zusätzliche Abweichung, die durch den Wechsel der Methoden hervorgerufen wird.
Neben den oben genannten Fehlern, welche die Präzision betreffen, ist je nach Zielsetzung die Aussagekraft der Analyse (Validität) zu bedenken. So wird z.B. für Fragen der Dränung besser nur mit Destwasser dispergiert, weil der dabei enthaltene Tongehalt im Hinblick auf die Beurteilung von Dränmaßnahmen aussagesicherer ist. Für Fragen des Kationenaustausches (Düngebedarfsanalyse) ist dagegen die Dispergierung mit Na-Pyrophosphat aussagekräftiger. Je nach Fragestellung ist auch zu beurteilen, ob Carbonat zerstört werden soll und ob hohe Salzgehalte zuvor ausgewaschen werden. Hohe Salzgehalte halten die Tonfraktion geflockt und lassen dadurch den Boden grobkörniger erscheinen. Für bodenbiologische Fragen kann es dagegen angebracht sein, auf die Humuszerstörung zu verzichten, weil die Bodenmikroflora im Wesentlichen auf der Oberfläche der Mikroaggregate aus Ton und Humus lebt und nicht auf den primären Mineralpartikeln.

9.6 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.	Datum:

Herkunft der Bodenprobe: (Beschreibung siehe Protokoll 8.5)	Sedimentation: Beginn ...., Ende .... Dauer: .... min, Temperatur: .... °C Entnahmetiefe: .... cm

Einwaage:		Sand:	
Arbeitseinwaage (E_A)	.... [g]	Brutto (Tiegel + Siebrückst.)	.... [g]
% H_2O in der E_A	.... [%]	- Tara (Tiegel)	.... [g]
% org. Substanz in der E_A[8]	.... [%]	= Sand in E_{ber}	.... [g]
Berichtigte Einwaage (E_{ber})		/ E_{ber} [g] x 100	
$E_{ber} = \frac{E_A}{100} \cdot (100 - \%\text{org. Substanz} - \% H_2O)$	.... [g]	= **Sandanteil in Prozent**	.... [%]
Schluff:		Ton: (0,1 mg genau ablesen!)	
Gesamte Masse	100 [%]	Brutto (Wägegläschen + Ton)	.... [g]
- Tonanteil in Prozent	........,...... [%]	- Tara (Wägegläschen)	.... [g]
- Sandanteil in Prozent	........,...... [%]	- Salzabzug (Na-Pyrophosph.)	.............0,0067 [g]
= **Schluffanteil in Prozent**	........,...... [%]	= Ton in 10 ml (Vol. Pipette)	.... [g]
		x 100 = Ton in 1 L (Standzyl.)	.... [g]
		/ E_{ber} [g] x 100	
		= **Tonanteil in %**	.... [%]
Darstellung der Ergebnisse als Summenkurve (bitte eintragen!):			Bodenart aus dem Bodenartendreieck: .... Kurzzeichen: ....

Ton-Fraktion
Schluff-Fraktion
Sand-Fraktion
Feinschluff
Mittelschluff
Grobschluff
Feinsand
Mittelsand
Grobsand
%
100
80
60
40
20
0
lT
uL
lS
2
6,3
20
63
200
630
2000 µm

---

[8] Falls kein Analysenwert vorliegt, Schätzwerte verwenden: Wald und Grünland 5-8%, Acker 2-4%, Unterboden 1%.

10 Bodenart mittels Fingerprobe

10.1 Einleitung

In vielen Fällen ist es ausreichend, lediglich eine grobe Klassifizierung der Bodenart vorzunehmen. Hierfür eignet sich die so genannte Fingerprobe. Sie besteht darin, die Körnungsanteile einer feuchten Probe aufgrund der Kriterien *Plastizität*, *Rollfähigkeit*, *Schmierfähigkeit* und *Rauhigkeit* zu schätzen. Hierzu gibt es verschiedene Schemata (siehe Anlagen). Im Prinzip beruhen die Methoden auf folgenden Unterscheidungsmerkmalen für Ton, Schluff und Sand.

Bodenart	Körnigkeit	Bindigkeit und Formbarkeit
S, Sand	Einzelkörner gut sichtbar und fühlbar; rauh (je feiner, desto weniger)	nicht bindig, haftet nicht am Finger; nicht formbar
U, Schluff	Einzelkörner nicht mit bloßem Auge oder Lupe zu unterscheiden; glitzern im Sonnenlicht samtartig mehlig	nicht bindig, nicht schmierig, haftet gut, klebt nicht, wenig formbar, bricht bei jeder Verformung, nicht ausrollbar; beim Schütteln nasser Proben sammelt sich das Wasser
T, Ton	keine Körner sicht- und fühlbar, Oberfläche glatt	bindig, stark zähplastisch, klebt, schmiert, sehr gut form- und ausrollbar, zeigt beim Schütteln kein Austreten von Wasser, glänzende Reibefläche

10.2 Durchführung

- **Bindigkeit beurteilen**
  Ein Aliquot der Probe wird in einem Schälchen mit wenig Leitungswasser oder 0,01 M $CaCl_2$ (tropfenweise) befreuchtet, so dass der Boden gerade geknetet werden kann. Dann wird der Boden zwischen den Fingern zerrieben und die Bindigkeit in den Stufen 0 bis 5 (siehe Kartieranleitung in der Anlage) beurteilt.
- **Formbarkeit beurteilen**
  Anschließend wird die Formbarkeit der Bodenprobe beurteilt, indem auf der Handfläche eine Wurst gerollt wird, etwa halb so dick wie ein Bleistift. Die Formbarkeit wird in den Stufen 0 bis 5 nach Kartieranleitung (Anlage) beurteilt.
- **Bodenartenuntergruppe bestimmen**
  Die Bodenartenuntergruppe wird aufgrund des Schemas der Kartieranleitung (Anlage) bestimmt und in das Protokoll eingetragen.
- **Ton-, Schluff-, und Sandgehalt ablesen**
  Aufgrund des Bodenartendreiecks oder der entsprechenden Tabelle der Kartieranleitung werden die Anteilsbereiche der Ton-, Schluff- und Sandfraktion abgelesen und im Protokoll vermerkt.

10.3 Fehler

Geübte Personen können 20 bis 30 Bodenartengruppen unterscheiden. Bei einem Tongehalt über etwa 20% ist eine Unterscheidung kaum möglich. Auf folgende Fehlerquellen sollten Ungeübte achten:

- Feuchtigkeit: Trockene Proben werden von Ungeübten oft zu grobkörnig geschätzt, nasse dagegen zu feinkörnig.
- Humusgehalt: Bei hohen Humusgehalten wird oft der Tongehalt überschätzt (Farbe beachten!).
- Karbonat: Die Verkittung von Primärpartikeln mit $CaCO_3$ läßt den Tongehalt zu gering erscheinen.
- Eisen: Bei diffuser Verteilung wird der Tongehalt, bei Konkretionen der Sandgehalt leicht zu hoch eingeschätzt.

10.4 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.:	Datum:

Herkunft der Bodenprobe: ……………………………………………
(Beschreibung siehe Protokoll 8.5)

Bindigkeit: Bewertung von 0 (nicht bindig, zerbröselt sofort) bis Stufe 5 (sehr stark bindig, zerbröselt nicht)	Stufe:	Formbarkeit (= Ausrollbarkeit): Bewertung von 0 (nicht ausrollbar) bis Stufe 5 (dünner als halber Bleistift ausrollbar)	Stufe ....

Bodenart gemäß der Kartieranleitung (Tab. 26):

: .... Kurzzeichen Fingerprobe: ....

Anteile (abgelesen aus dem Bodenartendreieck Abb. 17 oder Tab. 26 der Kartieranleitung):

Ergebnis der Fingerprobe: Körnungsklasse	Untergrenze	Obergrenze	**Ergebnis der Körnungsanalyse (S. 38)**
Sand %	.........%	.........%	.........%
Schluff %	.........%	.........%	.........%
Ton %	.........%	.........%	.........%

Interpretation (Methodenvergleich, Präzision, Praktikabilität):

Durchmesser		Fraktion	Unter-fraktion	Kurz-zeichen		
in µm	**in mm**					
< 2,0	**< 0,002**	**Ton**		**T**	Feinboden	Abschlämmbare Teile
< 0,2			Feinton	fT		
0,2 - 0,63			Mittelton	mT		
0,63 - 2,0			Grobton	gT		
2 - 63	**0,002 - 0,063**	**Schluff**		**U**		
2 - 6,3			Feinschluff	fU		
6,3 - 20			Mittelschluff	mU		
20 - 63			Grobschluff	gU		
63 - 2000	**0,063 - 2,0**	**Sand**		**S**		
63 - 200			Feinsand	fS		
200 - 630			Mittelsand	mS		
630 - 2000			Grobsand	gS		
2000 - 63000	**2 - 63**	**Grus/Kies**		**Gr/G**		
> 63000	**> 63**	**Steine**		**X/O**		

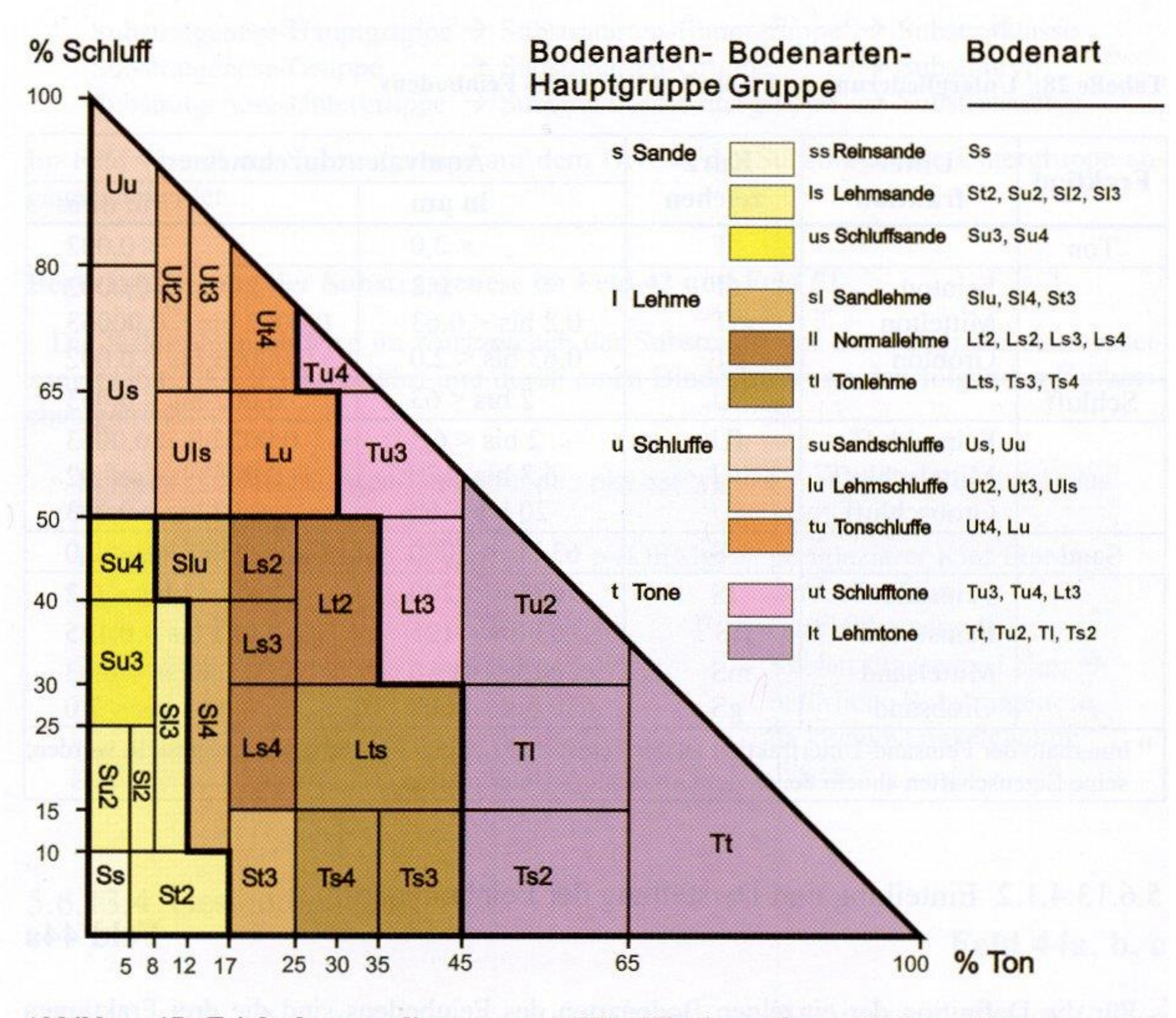


Abbildung 17: Feinbodenartendiagramm mit Klassifikation auf verschiedenen Niveaus

Tabelle 26: Grenzwerte der Bodenarten (Anteile der Fraktionen)

Bodenartenuntergruppen	Kurzzeichen	Kornfaktionen (Masse-%)		
		Ton	Schluff	Sand
reiner Sand	Ss	0– 5	0– 10	85–100
schwach schluffiger Sand	Su2	0– 5	10– 25	70– 90
schwach lehmiger Sand	Sl2	5– 8	10– 25	67– 85
mittel lehmiger Sand	Sl3	8– 12	10– 40	48– 82
schwach toniger Sand	St2	5– 17	0– 10	73– 95
mittel schluffiger Sand	Su3	0– 8	25– 40	52– 75
stark schluffiger Sand	Su4	0– 8	40– 50	42– 60
schluffig-lehmiger Sand	Slu	8– 17	40– 50	33– 52
stark lehmiger Sand	Sl4	12– 17	10– 40	43– 78
mittel toniger Sand	St3	17– 25	0– 15	60– 83
schwach sandiger Lehm	Ls2	17– 25	40– 50	25– 43
mittel sandiger Lehm	Ls3	17– 25	30– 40	35– 53
stark sandiger Lehm	Ls4	17– 25	15– 30	45– 68
schwach toniger Lehm	Lt2	25– 35	30– 50	15– 45
sandig-toniger Lehm	Lts	25– 45	15– 30	25– 60
stark sandiger Ton	Ts4	25– 35	0– 15	50– 75
mittel sandiger Ton	Ts3	35– 45	0– 15	40– 65
reiner Schluff	Uu	0– 8	80–100	0– 20
sandiger Schluff	Us	0– 8	50– 80	12– 50
schwach toniger Schluff	Ut2	8– 12	65– 92	0– 27
mittel toniger Schluff	Ut3	12– 17	65– 88	0– 23
sandig-lehmiger Schluff	Uls	8– 17	50– 65	18– 42
stark toniger Schluff	Ut4	17– 25	65– 83	0– 18
schluffiger Lehm	Lu	17– 30	50– 65	5– 33
mittel toniger Lehm	Lt3	35– 45	30– 50	5– 35
mittel schluffiger Ton	Tu3	30– 45	50– 65	0– 20
stark schluffiger Ton	Tu4	25– 35	65– 75	0– 10
schwach sandiger Ton	Ts2	45– 65	0– 15	20– 55
lehmiger Ton	Tl	45– 65	15– 30	5– 40
schwach schluffiger Ton	Tu2	45– 65	30– 55	0– 25
reiner Ton	Tt	65–100	0– 35	0– 35

Tabelle 28: Definition der Formbarkeits- und Bindigkeitsstufen*

Kennzeichnung der Stufen	Bezeichnung/Kennzeichnung	
	Bindigkeit (Klebrigkeit)	
	Zusammenhalt der Bodenprobe:	zerbröselt/zerbricht:
0	kein	sofort
1	sehr gering	sehr leicht
2	gering	leicht
3	mittel	nicht
4	stark	nicht
5	sehr stark	nicht
	Formbarkeit = Ausrollbarkeit (hier: Bewertung der Ausrollbarkeit einer Probe bis auf halbe Bleistiftstärke)	
0	= Probe nicht ausrollbar, zerbröckelt beim Versuch	
1	= nicht auf halbe Bleistiftstärke ausrollbar, da die Probe vorher reißt und bricht	
2	= Ausrollen auf halbe Bleistiftstärke schwierig, da die Probe starke Neigung zum Reißen und Brechen aufweist	
3	= ohne größere Schwierigkeiten auf halbe Bleistiftstärke ausrollbar, da die Probe nur noch schwach reißt oder bricht	
4	= leicht auf halbe Bleistiftstärke ausrollbar, da die Probe nicht mehr reißt oder bricht	
5	= auf dünner als halbe Bleistiftstärke ausrollbar	

*Diese Feldmethode ist in den meisten Fällen ausreichend zur Bestimmung der Bodenartenuntergruppe. Speziell bei tonreichen Böden sind neben der Formbarkeit und Bindigkeit weitere Merkmale hinzuzuziehen.

Schlüssel zur Bestimmung der Bodenarten des Feinbodens mittels Fingerprobe

Bindig-keit	Form-barkeit	Sandkomponente SK = Sandkörner	weitere Kennzeichen FS = Feinsubstanz[9], RF = Reibefläche	Boden-art	Ton	Schluff	Sand
0	0	alleinige Komponente	ohne erkennbare Feinsubstanz	Ss	0-5	0-10	85-100
0	0	SK gut sicht- und fühlbar	sehr wenig FS in Fingerrillen	Su2	0-5	10-25	70-90
0	0		Fingerrillen voll FS, schwach mehlig	Su3	0-8	25-40	52-75
0	0		viel FS, stark mehlig	Su4	0-8	40-50	42-60
0 - 1	1	SK sicht- und fühlbar	FS deutlich in Fingerrillen, samtig-mehlig	Us	0-8	50-80	12-50
0 - 1	1	SK kaum oder nicht sicht- und fühlbar	nur FS führend	Uu	0-8	80-100	0-20
1	1 - 2	SK sicht- und fühlbar	sehr wenig FS	Sl2	5-8	10-25	67-85
1 - 2	1 - 3		sehr wenig FS	St2	5-17	0-10	73-95
2	3		wenig bis mäßig FS	Sl3	8-12	10-40	48-82
1 - 2	1 - 3		FS deutlich in Fingerrillen	Uls	8-17	50-65	18-42
1	2	SK kaum sicht- und fühlbar	nur FS führend, FS deutlich in Fingerrillen, stark mehlig	Ut2	8-12	65-92	0-27
2	2	SK nicht sicht- und fühlbar	nur FS führend, FS deutlich in Fingerrillen, stark mehlig	Ut3	12-17	65-88	0-23
1 - 2	3	SK deutlich sicht- und fühlbar	viel FS, deutlich mehlig	Slu	8-17	40-50	33-52
2	3		mäßig bis viel FS, schwach glänzende RF	Sl4	12-17	10-40	43-78
3	3		mäßig FS, sehr klebrig („Honigsand“)	St3	17-25	0-15	60-83
3	3		viel FS, sehr schwach mehlig	Ls2	17-25	40-50	25-43
3	3		viel FS, sehr deutlich körnig	Ls3	17-25	30-40	35-53
3	3		mäßig FS, sehr deutlich körnig	Ls4	17-25	15-30	45-68
3	3	SK nicht sicht- und fühlbar	nur FS, schwach mehlig	Ut4	17-25	65-83	0-18
4	4	SK gut sicht- und fühlbar	deutlich körnig, rauhe glänzende RF	Ts4	25-35	0-15	50-75
4	4		sehr viel FS, schwach rauhe, schwach glänzende RF	Lt2	25-35	30-50	15-45
4	4	SK nicht oder kaum sicht- und fühlbar	sehr viel FS, rauhe, glänzende RF, körnig	Lu	17-30	50-65	5-33
4	4	SK nicht sicht- und fühlbar	nur FS, rauhe, schwach glänzende RF	Tu4	25-35	65-75	0-10
5	5	SK deutlich sicht- und fühlbar	schwach rauhe, glänzende RF, klebrig, deutlich körnig	Ts3	35-45	0-15	40-65
5	5		sehr stark glänzende RF, körnig	Lts	25-45	15-30	25-60
5	5		sehr viel FS, schwach rauhe, stark glänzende RF	Lt3	35-45	30-50	5-35
5	5	wenige SK sicht- und fühlbar	stark glänzende RF	Ts2	45-65	0-15	20-55
5	5	sehr wenige SK sicht- und fühlbar	sehr viel FS, glänzende RF	Tl	45-65	15-30	5-40
5	5	SK nicht sicht- und fühlbar	sehr reich an FS, schwach rauhe, glänzende RF	Tu3	30-45	50-65	0-20
5	5		wie oben, stark plastisch	Tu2	45-65	30-55	0-25
5	5		RF glatt und schwach glänzend, mm-dünn ausrollbar	Tt	65-100	0-35	0-35

Sande	Reinsande	Ss	Lehmsande	St2, Su2, Sl2 Sl3	Schluffsande	Su3, Su4
Lehme	Sandlehme	Slu, Sl4, St3	Normallehme	Lt2, Ls2, Ls3, Ls4	Tonlehme	Lts, Ts3, Ts4
Schluffe	Sandschluffe	Us, Uu	Lehmschluffe	Ut2, Ut3, Uls	Tonschluffe	Ut4, Lu
Tone	Schlufftone	Tu3, Tu4, Lt3	Lehmtone	Tt, Tu2, Tl, Ts2		

[9] Unter Feinsubstanz (FS) werden hier die Korngrößen Schluff und Ton zusammengefasst

11 Phosphor und Kalium mit der CAL-Methode

11.1 Einleitung

Phosphor und Kalium gehören zu den quantitativ wichtigsten Nährstoffen für Pflanzen und Tiere. Der Entzug mit dem Erntegut wird üblicher Weise durch entsprechende Düngermengen ersetzt. In den meisten Böden sind die Gesamtgehalte an P und K deutlich höher (Faktor 10 bis >100) als dem jährlichen Entzug durch Pflanzen entspricht. Nur ein kleiner Teil der Nährelemente ist allerdings pflanzenverfügbar. Der überwiegende Teil ist unter natürlichen Umständen nicht unmittelbar zugänglich für die Aufnahme durch die Wurzel (Adsorption, Bindung in Form schwer löslicher Salze, spezifische Bindung in 2:1-Tonmineralen, Bindung in stabiler organischer Substanz). Ein Mangel an Phosphor oder Kalium kann empfindliche Ertrags- und Qualitätseinbußen bedeuten. Deshalb wurde nach Methoden gesucht, welche den Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor und Kalium anzeigen können. In Deutschland hat sich unter anderem die CAL-Methode hierfür etabliert. CAL steht für Calzium-Acetetat-Lactat. Die CAL-Methode wird in Deutschland von den staatlichen Fachbehörden der Länder und deren Beratungseinrichtungen neben der sehr ähnlichen DL-Methode unterstützt. Die DL-Methode extrahiert den Boden bei pH 3,6 und löst im Unterschied zur CAL-Methode auch Apatit. In den meisten europäischen Ländern und in Übersee werden andere Methoden angewandt. Gemessen an der Anzahl an Proben und am Umfang der untersuchten Flächen dominiert in Süddeutschland, Österreich und der Schweiz die Elektro-Ultrafiltration (EUF-Methode).

11.2 Prinzip der Methode

Das Prinzip der CAL-Methode beruht darauf, den Boden mit einer sauer gepufferten Lösung (0,05 *M* Ca-Lactat + 0,05 *M* Ca-Acetat + 0,3 *M* Essigsäure, pH 4,1) zu versetzen. Phosphat (und in der landwirtschaftlichen Praxis auch das Kalium) wird dann in dem Extrakt bestimmt. Der niedrige pH-Werte fördert die Löslichkeit von Ca-Phosphaten und die Desorption von K^+. Der Austausch von K^+ wird darüber hinaus auch noch durch die im Vergleich zur Bodenlösung hohe Ca^{2+}-Konzentration bewirkt. Die organischen Säureanionen (Lactat und Acetat) bewirken vermutlich, dass trotz des niedrigen pH-Wertes ein kleiner Teil des adsorbierten Phosphats via Ligandenaustausch in Lösung gehen kann. Die Suspension aus Boden und CAL-Lösung wird 90 Minuten geschüttelt, um die Desorption bzw. das Lösen von Nährionen zu beschleunigen. Es ist bekannt, dass auch Pflanzen in der Lage sind, den pH in der Rhizosphäre abzusenken und dass sie organische Säuren ausscheiden. Man nimmt an, dass sich die Pflanzen auf diese Weise P und K in der Rhizosphäre verfügbar machen können. Modellrechnungen haben allerdings gezeigt, dass der entscheidende Faktor für die Nachlieferung von Nährionen in die Bodenlösung darin besteht, dass die Nährionen kontinuierlich aus dem Gleichgewicht zwischen Sorbent bzw. Salz und der Bodenlösung entzogen werden. Die Aufnahme der Ionen durch die Pflanze ist also der entscheidende Antrieb für die Nachlieferung in die Bodenlösung. Dieses Prinzip wird von der EUF-Methode simuliert, nicht aber durch einfache Extraktionsmethoden wie der CAL- oder der DL-Extraktion.

11.3 Durchführung

11.3.1 Geräte und Chemikalien

PE-Schüttelflaschen, Rotationsschüttler, Atomabsorbtionsspektrometer (AAS),Photometer, Molybdat-Vanadat-Reagenz, Eichlösungen für P und K, CAL-Lösung

11.3.2 Herstellen der CAL-Lösung (wird im Praktikum zur Verfügung gestellt)

Die CAL-Lösung wird in zwei Schritten hergestellt. Zunächst wird eine 5fach konzentrierte CAL-Vorratslösung angesetzt[10]:

77,0 g Ca-Laktat zur Bodenuntersuchung
39,5 g Ca-Acetat p.a.
89,5 ml Essigsäure p.a. (Eisessig)

[10] Werden nur geringe Mengen CAL-Lösung benötigt, dann kann die Lösung auch direkt aus den Salzen hergestellt werden.

Das Ca-Laktat und das Ca-Acetat werden getrennt zwei Bechergläsern eingewogen und dann in einem großen Becherglas (> 800 ml) zusammengeschüttet. Hier werden die Salze dann gemeinsam unter Rühren in ca. 600 ml heißem Wasser (ca. 90 °C) gelöst. Die heiße Lösung wird dann in einen 1000 ml Messkolben überführt und dann der Eisessig in die noch heiße Lösung gegeben. Anschließen wird die heiße Lösung mit Wasser bis kurz unter die 1-Liter-Eichmarke des Messkolbens aufgefüllt. Nach dem Abkühlen der Lösung wird mit Wasser bis zur Eichmarke aufgefüllt. mit Die drei Komponenten werden jeweils separat in ca. 300 ml Destwasser gelöst. Um die Lösung von Ca-Laktat zu beschleunigen wird das Wasser erhitzt. Nach dem Abkühlen werden die Lösungen in einem 1 L Messkolben zusammengegossen und mit H_2O bis zur Marke aufgefüllt. Zur Herstellung der CAL-Gebrauchslösung wird die Vorratslösung mit Destwasser um den Faktor 5 verdünnt.

11.3.3 Herstellen der Farbreagenz (wird im Praktikum zur Verfügung gestellt)
Als Farbreagenz für die kolorimetrische P-Bestimmung wird ein Molybdat-Vanadat-Reagenz hergestellt. Molybdat und Vanadat sind **giftig!**
Die Herstellung des Farbreagenz erfolgt in vier Schritten:

1. Salpetersäure (500 ml, konz. p.a.) wird mit 1000 ml H_2O gemischt.
2. Ammoniumvanadat (6,25 g, p.a.) wird in ca. 500 ml <u>heißem</u> Wasser in einem 1000 ml Messkolben gelöst, nach dem Abkühlen wird Salpetersäure (20 ml, konz. p.a.) zugesetzt und bis zur Marke mit Destwasser aufgefüllt.
3. Ammoniummolybdat (125 g p.a.) wird in ca. 500 ml <u>heißem</u> Wasser in einem 1000 ml Messkolben gelöst, nach dem Abkühlen wird bis zur Marke aufgefüllt.
4. Gebrauchslösung: Die Lösungen 1.), 2.) und 3.) werden nacheinander in dieser Reihenfolge und unter Rühren zusammengemischt.

11.3.4 Herstellen der Standardlösungen für die Eichreihe (wird im Praktikum zur Verfügung gestellt)

- 109,8 mg KH_2PO_4 p.a. und 130,5 mg KCl p.a. werden in 500 ml Wasser gelöst. Diese Lösung enthält 25 mg P und 100 mg K.
- Pipettieren von 0, 2, 5, 10 ml obiger Lösung in je einen 100 ml Messkolben.
- Jeweils 20 ml CAL-Vorratslösung zugeben und bis zur Marke mit Destwasser auffüllen.
- Verschließen und gut schütteln.

Diese Eichreihe enthält 0, 4, 10 und 20 μg K je ml sowie 0, 1, 2,5 und 5 μg P je ml Lösung.
Das entspricht 0, 8, 20 und 40 mg K je 100 g Boden bzw. 0, 2, 5 und 10 mg P je 100 g Boden, vorausgesetzt, das Verhältnis von Extraktionslösung zu Boden ist 20 (v/w) und die Standards werden genauso wie die Proben gemessen (z.B. bei K vor der Messung ebenfalls 1:10 verdünnt).

11.3.5 Arbeitsanweisung
Extraktion

- Bodeneinwaage: 5,00 g lufttrockener Feinboden.
- Hinzufügen einer kleinen Menge (Spatelspitze) Aktivkohle.
- Hinzufügen von 100 ml CAL-Gebrauchslösung.
- Schütteln in der Schüttelapparatur (2 h)
- Filtrieren durch Faltenfilter (z.B. S&S 512 oder Whatman 2V), die ersten ca. 10 ml verwerfen.

Phosphatbestimmung mit der so genannten „Gelbmethode“

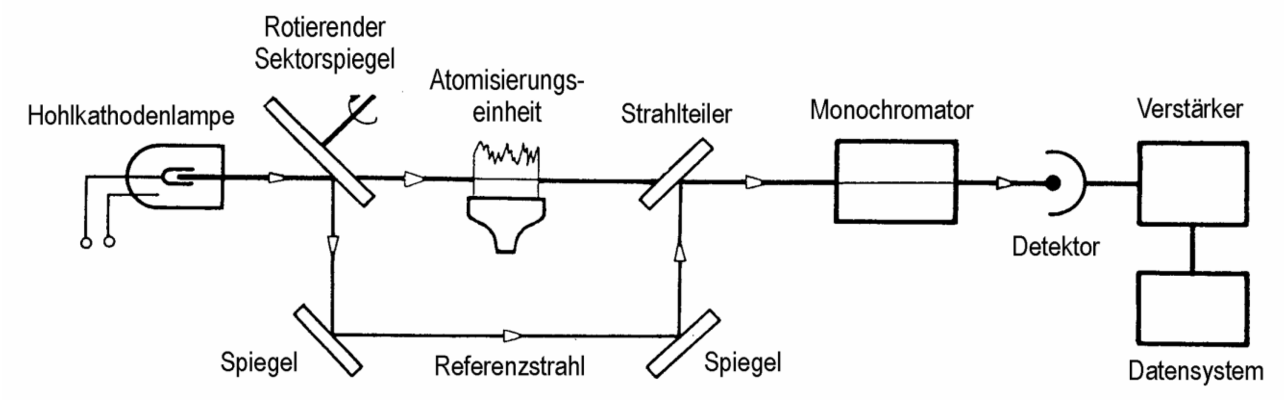
- **10 ml** des Perkolats **in einen 100 ml Erlenmeyerkolben** pipettieren, <u>nicht</u> auffüllen
- 0,4 ml Salpetersäure (konz., p.a.) zugeben (z.B. mit Mikroliterpipette der Fa. Roth)
- 2 ml Farbreagenz zugeben (z.B. mit Mikroliterpipette oder Dispensette)
- Schwenken und bis zur Ausbildung des Farbkomplexes stehen lassen (am besten > 30 min)
- Bestimmung der Extinktionen am Photometer bei 436 nm
- Eichreihe erstellen, Eichfaktor oder Eichgerade berechnen und darüber den P-Gehalt ermitteln.

Kaliumbestimmung

- **10 ml** des Perkolats **in 100 ml Messkolben**, mit Destwasser zur Marke auffüllen, um eine 1:10 Verdünnung herzustellen
- Bestimmung der K-Konzentration in den Standards (Eichreihe) und den Proben mittels AAS

11.3.6 Atomabsorptionsspektrometrie (AAS)

Die AAS ist ein Verfahren zum Nachweis und zur quantitativen Bestimmung von metallischen Elementen. Das Messprinzip beruht auf der Abschwächung eines Lichtstrahls durch Selbstabsorption. Als Selbstabsorption bezeichnet man den Effekt, dass im Grundzustand befindliche Atome – also von chemischen Bindungen befreite, nicht angeregte Atome – eines Elementes dasjenige Licht absorbieren, welches sie im angeregten Zustand bei den Wellenlängen ihrer „letzten Linien", insbesondere der Resonanzlinie, selbst aussenden würden. Zur Durchführung einer Analyse mittels AAS genügt es demnach, Licht der Resonanzlinie eines zu bestimmenden Elementes zu erzeugen, dieses Licht durch die kontinuierlich strömende, atomisierte Analysensubstanz hindurchzuleiten und danach die vom zu bestimmenden Element bewirkte Lichtabsorption zu messen (vgl. Schema in der Abbildung). Als Lichtquelle dient in der Regel eine Hohlkathodenlampe, die das zu bestimmende Element enthält. Der Brenner zerstäubt die angesaugte Messlösung zu einem feinen Nebel und bewirkt dann in der Flamme (meist Luft-Acetylen) eine Atomisierung der Analysensubstanz durch thermische Dissoziation. Nachdem der Lichtstrahl die Flamme passiert hat, werden im Monochromator alle Wellenlängen bis auf die Resonanzwellenlänge des zu messenden Elementes herausgefiltert. Das verbleibende Licht wird von einer Fotozelle im Empfänger detektiert, verstärkt und mit der Lichtintensität eines Referenzstrahls verglichen. Der Referenzlichtstrahl gelangt über Spiegel unter Umgehung der Atomisierungseinheit zum Detektor. Die gemessene Lichtintensität wird dann als Transmission (Durchlässigkeit in %) oder Extinktion (= log 1/Durchlässigkeit) angezeigt.



Schema der Atomabsorptionsspektroskopie

11.4 Darstellung und Bewertung

Die wissenschaftlichen Gesellschaften Deutschlands haben sich darauf geeinigt, Pflanzennährstoffe in Elementschreibweise (P statt P_2O_5, K statt K_2O) anzugeben. Für eine Übergangszeit kann die alte Oxidschreibweise neben der Elementschreibweise zusätzlich verwendet werden. Für die Umrechnung gilt:

1 mg P = 2,29 mg P_2O_5 und 1 mg P_2O_5 = 0,4367 mg P
1 mg K = 1,20 mg K_2O und 1 mg K_2O = 0,8301 mg K

Merke: P_2O_5 und K_2O gibt es weder im Boden noch im Dünger!

Die extrahierten Mengen an Kalium und Phosphor werden üblicherweise auf 100 g Bodentrockenmasse bezogen. Eine Umrechnung je ha Fläche, wie das für Nitrat üblich ist, sollte nicht vorgenommen werden, weil es sich bei den CAL-extrahierbaren Nährstoffmengen nicht um unmittelbar pflanzenverfügbare Gehalte handelt. Die Werte sind vielmehr als Kenngrößen für die Nährstoffverfügbarkeit zu interpretieren. Sie gewinnen nämlich erst durch die Kalibrierung in Feldversuchen

ihre Aussagekraft. Auf der Basis langjähriger, ortsfester Feldversuche wurde im VDLUFA im Jahr 1997 die Einstufung in Gehaltsklassen bundeseinheitlich wie folgt neu vorgenommen:

P-Gehaltsklasse	mg P/100 g Boden	mg P_2O_5/100 g Boden
A sehr niedriger Gehalt	≤ 2,0	≤ 5,0
B niedriger Gehalt	2,1 bis 4,4	6 bis 9
C anzustrebender Gehalt	4,5 bis 9,0	10 bis 20
D hoher Gehalt	9,1 bis 15,0	21 bis 34
E sehr hoher Gehalt	≥ 15,1	≥ 35

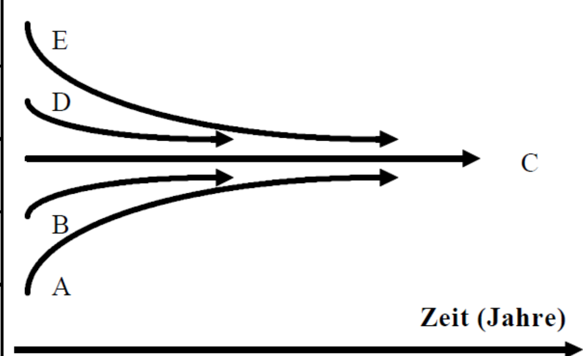
Für Kalium empfiehlt der VDLUFA in einem Standpunktpapier vom Jahr 1999 folgende neue Einstufung in die Gehaltsklasse C (= **anzustrebender Gehalt an CAL extrahierbarem K**), geringere Gehalte entsprechen der Gehaltsklasse A, höhere der Klasse E. Die Klassen B und D entfallen.

	K (mg/100 g Boden)	K_2O (mg/100 g Boden)
Sehr leichte Böden (0 bis 5 % Ton):	5- 8	6- 10
leichte Böden (6 bis 12 % Ton):	8- 12	10- 15
mittlere Böden (13 bis 25 % Ton):	8- 17	10- 20
schwere und sehr schwere Böden (> 25 % Ton):	11- 22	13- 26
Moorböden*)	7- 12	8- 15

*) Werte in mg/100 ml

Die Gehaltsklasse C ist wie folgt zu interpretieren: Wenn der Boden diese Konzentration an CAL-extrahierbaren Nährstoffen beinhaltet, dann ist nicht zu erwarten, dass durch eine Düngung des Nährstoffs ein Mehrertrag erzielt werden kann. Gedüngt werden sollte in dem Fall nur noch soviel, wie auch mit dem Erntegut entzogen wird (ausgeglichene Bilanz!). Bei höheren Nährstoffgehalten im Boden sollte dagegen weniger und bei höheren mehr gedüngt werden als dem Nährstoffentzug entspricht. Mit der Zeit wird sich dadurch die Nährstoffkonzentration im Boden in Richtung der Gehaltsklasse C ab- oder zunehmen.

P-Gehaltsklasse	Düngebedarf
E	keine Düngung
D	verminderte Düngung
C	Erhaltungs-düngung
B	erhöhte Düngung
A	stark erhöhte Düngung



11.5 Fehler

Die CAL-Extraktion ist im Routinebetrieb einfach durchzuführen und wenig fehleranfällig. Trotzdem treten beträchtliche Streuungen von bis zu 100 % auf, wenn man die gleichen Proben von unterschiedlichen Labors untersuchen lässt. Dies beruht vermutlich darauf, dass die Extraktionslösung nicht sorgfältig hergestellt wurde, dass zu altes Farbreagenz verwendet wurde oder dass bei der Kalibrierung und Messung Schreib- und Rechenfehler auftreten.

11.6 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.:	Datum:

Herkunft der Bodenprobe: …………………………………………
(Beschreibung siehe Protokoll 8.5)

Bodeneinwaage: .... g Bodentrockenmasse

Eichfaktor für P-Bestimmung:	Konzentration	Extinktion 436 nm	Faktor [µg P/Extinktion]
	5 µg P ml^{-1}	....	....
	10 µg P ml^{-1}	....	....
	20 µg P ml^{-1}	....	....
	30 µg P ml^{-1}	....	....
	Blindwert	....	Eichfaktor: ....

Rechnung für Bodenprobe:

Extinktion der P-Bestimmung .... minus Blindwert = a-Probe Netto-Extinktion: …………….

Extinktion der P-Bestimmung .... minus Blindwert = b-Probe Netto-Extinktion: …………….

Netto-Extinktion im Mittel von a- und b-Probe: …………….

mal Eichfaktor	⇒ P-Konzentration	....	µg P ml^{-1}
mal ml Extrakt	⇒ P extrahiert	....	µg P
geteilt durch Bodeneinwaage (g)	⇒ P je g Boden	....	µg P / g Boden
mal 100	⇒ P in 100 g Boden	....	µg P/100 g Boden
Umrechnen von µg auf mg: / 1000		....	mg P/100 g
Umrechnen auf P_2O_5: mal 2,29		....	mg P_2O_5/100 g

Gehaltsklasse (siehe Tabelle in Kapitel 11.4, S. 47f): ....

Blindwert ………… mg K/Liter	
Konz. a-Probe: .... mg K/Liter (brutto)	Mittel von a- und b-Probe: .... mg K / Liter
Konz. b-Probe: .... mg K/Liter (brutto)	Blindwert abziehen: .... mg K / Liter
Umrechnen in mg / 100 g Boden (wie oben zu P)!	K in 100 g Boden .... mg K/100 g
Umrechnung in Oxidbezeichnung (Faktor 1,20)	K_2O in 100 g Boden .... mg K_2O/100 g
Tongehalt .... aus Körnungsanalyse (S. 38):	
Gehaltsklasse aus Tab. S. 47 ablesen, A und B bzw. D und E werden nicht mehr unterschieden	Gehaltsklasse : ....

Interpretation der Messergebnisse (Was bedeuten die Messwerte für den Düngebedarf und die Versorgung der Pflanzen mit P und K?):

12 Neubauer-Versuch zur Bestimmung von pflanzenverfügbaren Nährstoffen

12.1 Einleitung

Böden enthalten in der Regel sehr große Mengen an Pflanzennährstoffen, zum Beispiel Phosphor und Kalium, aber nur ein kleiner Teil davon ist für die Pflanzen verfügbar. In welchem Umfang die im Boden vorhandenen Nährstoffe für die Pflanzen verfügbar sind, hängt von vielen Faktoren ab, die mit chemischen und physikalischen Methoden der Bodenuntersuchung nicht hinreichend erfasst werden können. Im Neubauerversuch, wird deshalb die Nährstoffaufnahme von Keimpflanzen unter kontrollierten Bedingungen dazu verwendet, die pflanzenverfügbare Nährstoffmenge anzuzeigen.

12.2 Prinzip der Methode

Auf dem zu untersuchenden Boden lässt man Winterroggenpflanzen 14 Tage lang wachsen und ermittelt danach die von den Pflanzen aufgenommene Phosphor- und Kaliummenge. Bei dieser Methode werden die Keimpflanzen gewissermaßen als Extraktionsmittel benutzt; im Unterschied zur chemischen Extraktion erfolgt jedoch durch die lebende Wurzel ein ständiges Lösen und Aufnehmen der Nährstoffe.

12.3 Durchführung

12.3.1 Ansetzen des Versuchs

Jeder Teilnehmer setzt ein Gefäß an. Zusätzlich wird je Praktikumgruppe ein Kontrollgefäß angesetzt.

1. Als Pflanzengefäße (Neubauerschalen) werden 500 ml Gefrierdosen verwendet. 100 g des zu untersuchenden lufttrockenen Bodens und 50 g Quarzsand werden eingewogen und gut miteinander vermischt. (Bei dem Kontrollgefäß 150 g Quarzsand verwenden!)
2. Das trockene Sandbodengemisch wird in der Neubauerschale gleichmäßig verteilt und mit einem Stopfen leicht angedrückt. Das Boden-Sandgemisch im Gefäß wird aus einer Pipette mit 25 ml N-haltiger Lösung (10 mg N als Ammoniumnitrat in 25 ml) gleichmäßig befeuchtet.
3. 125 g Quarzsand werden abgewogen, in die Neubauerschale gegeben, gleichmäßig ausgebreitet und mit 50 ml entionisiertem Wasser gleichmäßig befeuchtet. Blindwerte nur mit 40 ml befeuchten!
4. Auf der Bodenoberfläche werden 100 Roggenkörner gesät und mit einem Gummistopfen leicht in den Boden eingedrückt.
5. Es werden nochmals 125 g Quarzsand abgewogen, in das Neubauergefäß als Deckschicht gegeben und gleichmäßig verteilt.
6. Um später die Wasserverluste kontrollieren zu können, sind die angesäten Gefäße zu wiegen und das Gewicht im Protokoll sowie auf dem Gefäß (ohne Nachkommastelle) zu notieren. Die Gefäße werden zur Vermeidung von Wasserverlusten mit einer Kunststofffolie oder Glasplatte abgedeckt und bei einer Temperatur von 18 bis 22 °C aufgestellt.
7. In die Mitte der Gefäße werden später (nach dem Auflaufen des Getreides) zwei große Pipettenspitzen gesteckt. Über diese Spitzen wird dem Boden das Wasser zugeführt.

12.3.2 Betreuung des Versuchs

1. Wenn die Pflanzen die Glasplatte erreicht haben (3 bis 4 Tage nach der Aussaat), wird diese entfernt. Von nun an müssen die Wasserverluste täglich ergänzt werden. Dazu werden die Gefäße täglich gewogen und dabei über die in den Boden gesteckte Pipettenspitze so viel entionisiertes Wasser zugegeben, bis das ursprüngliche Gewicht wieder erreicht ist.

2. Ca. 14 Tage nach dem Auflaufen der Keimlinge wird geerntet. Dazu lockert man durch Klopfen an die Gefäßwand den Gefäßinhalt, nimmt diesen durch Zusammenfassen der Sprosse heraus, breitet ihn auf einem Teller oder einem Bogen Papier aus und entfernt den trockenen Decksand durch Ausschütteln möglichst vollständig. Die Sprosse werden mit einer Schere dicht über den Samenkörnern abgeschnitten. Durch Schütteln der zusammengefassten Sprosse entfernt man noch anhaftende Sandkörner.
   Das Pflanzenmaterial wird in eine zu beschriftende Papiertüte gegeben und bei 80 °C im Trockenschrank getrocknet.

12.3.3 Mahlen

Für die Analyse werden nur 400 mg des Pflanzenmaterials verwendet. Um so eine kleine Menge homogenen Pflanzenmaterials herzustellen, muss das getrocknete Material pulverisiert werden. Im Praktikum wird dafür eine Zentrifugalmühle der Fa. Fritsch verwendet. Das Mahlen der Proben wird nach Einweisung durch Frau Walk von Studenten am Mittwoch der zweiten Praktikumswoche durchgeführt, damit die Proben dann am Donnerstag für den Aufschluss zur Verfügung stehen.

12.3.4 Aufschließen des Pflanzenmaterials

Die organischen Bestandteile des Pflanzenmaterials werden bei 180 °C mit konzentrierter Salpetersäure und Wasserstoffperoxid vollständig zerstört und oxidiert. Das Verfahren heißt Mikrowellen-Druckaufschluss und ist in Routinelabors das übliche Verfahren, um organische Proben für die Analyse vorzubereiten.
Vorgehensweise:

- Einwaage von ca. 400 mg (350 mg bis 450 mg) der Pflanzensubstanz in einen Druckaufschlussbehälter (auf Analysenwaage direkt in Aufschlussglass einwiegen, genauen Wert der Einwaage im Protokoll notieren!)
- 10,0 ml konzentrierte HNO_3 unter dem Abzug zugeben (**Schutzbrille** anziehen, Dispenser benutzen!)
- Aufschlussglas in PTFE-Gefäß mit der passenden Proben-Nr. einführen.
- Gefäß mit der Säure unter dem Abzug stehen lassen und ca. 20 min vorreagieren lassen.
- Gefäß verschließen (Werkzeug mit Drehmomentkontrolle verwenden!)
- Einsetzen der Druckaufschlussgefäße in den Drehtelleraufsatz des Mikrowellengeräts
- Mikrowellenaufschluss mit Programm bis 180 °C starten.
- Abkühlen der Druckgefäße abwarten.
- Nach dem Abkühlen werden die Gefäße unter dem **Abzug** geöffnet, **Brille, Handschuhe!!**
- Mit Pinzette Glasgefäß herausnehmen und schwenken (dient der Entgasung)
- Überführen der Lösung in 50 ml Messkolben, dabei schwenken und auffüllen (Achtung Lösungswärme), auf Raumtemperatur abkühlen lassen, entgültig bis zur Marke auffüllen. Diese Lösung wird im Folgenden als „Aufschlusslösung“ bezeichnet.
- Stopfen drauf und Schütteln.
- Niederschlag in der Analysenlösung mittels Faltenfilter abtrennen und die nun klare Aufschlusslösung in 50 ml PE-Flaschen bis zur Analyse aufbewahren.
- Aufschlusslösung verdünnen:
  a) für P-Bestimmung Faktor 100: **0,5 ml** der Analysenlösung in **50er** Messkölbchen pipettieren, bis zur Marke auffüllen, Stopfen drauf, schütteln Kölbchen mit Proben-Nr. beschriften.
  b) für K-Bestimmung Faktor 200: **0,5 ml** der Analysenlösung in **100er** Messkölbchen pipettieren, bis zur Marke auffüllen, Stopfen drauf, schütteln Kölbchen mit Proben-Nr. beschriften, Lösung in Reagenzglas für die Messung im AAS abfüllen, Reagenzglas beschriften.

12.3.5 Bestimmung von Phosphor in der verdünnten Aufschlusslösung
Die Bestimmung des P-Gehaltes erfolgt mit der Molybdän-Blau-Methode nach dem gleichen Prinzip wie die P-Bestimmung im CAL-Extrakt. Allerdings wird für die Bestimmung ein Fuel-Injektion-Analyser (FIA) und Molybdän statt Vanadat für den Farbkomplex verwendet.

12.3.6 Bestimmung von Kalium in der verdünnten Aufschlusslösung
Die Bestimmung des K-Gehaltes erfolgt unmittelbar in der verdünnten Analysenlösung mit dem Atomabsorptionsspektrometer (AAS) nach dem gleichen Prinzip wie im CAL-Extrakt

12.4 Darstellung und Bewertung

12.4.1 Darstellung
Bei der Berechnung der P-Gehalte in der Ausgangsprobe sind außer der P-Konzentration in der verdünnten Aufschlusslösung auch die Einwaage an Pflanzenmaterial und ggf. die während des Analysenganges vorgenommenen Verdünngungen sowie unter Umständen die Umrechnung von P auf P_2O_5 zu berücksichtigen. Für die Berechnung der K-Gehalte gilt das gleiche.

Von den errechneten P- und K-Mengen werden die entsprechenden Mengen P und K im Aufwuchs des Kontrollgefäßes (ohne Boden) abgezogen. Die pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Kontroll-gefäß stammen aus dem Saatgut und nicht aus dem Boden. Die errechneten Differenzwerte ergeben die dem Boden entzogenen Nährstoffe. Die Nährstoffmengen werden in mg je 100 g Boden angegeben.

12.4.2 Beispielrechnung:
Netto-Extinktion der Messung: 0,15 Ext.
Eichfaktor: 2,86 mg P l^{-1} / Ext.
Umrechnung: P-Konzentration in der verdünnten Aufschlusslösung gemessen:
= Extinktion mal Eichfaktor 0,429 mg P l^{-1}

Faktor Vorverdünnung: 200
P-Konzentration in der nicht verdünnten Aufschlusslösung:
= Konzentration mal Verdünnungsfaktor 0,572 x 200 = 85,8 mg P l^{-1} **= 85,8 µg P ml^{-1}**

Volumen der Aufschlusslösung: 50 ml
P-Menge in der Aufschlusslösung = Volumen mal Konzentration 85,8 mal 50 = 4290 µg P

TM-Einwaage für den Aufschluss: 400 mg
P-Konzentration in der Pflanzentrockenmasse: 4290 µg P **/** 400 mg TM = **10,725 µg P / mg TM**
= 10,725 mg P / g TM = 0,0107 g P/ g TM = 1,07 g P / 100 g TM = 1,07 % P.

Geerntete Pflanzentrockenmasse (TM): 1,2 g TM / Gefäß
P-Menge im Pflanzenaufwuchs je Gefäß: 10,7 mg P / g TM x 1,2 g TM / Gefäß
= 12,87 mg P/Gefäß
P-Menge im Kontrollgefäß gemessen (gleicher Rechenweg wie oben!): = 5,62 mg P/Gefäß
P-Menge aus dem Boden (Differenz) 12,87 – 5,62 = **7,25 mg P/Gefäß**
Bodenmenge in der Neubauerschale 100 g Boden
Pflanzenverfügbare P-Menge aus 100 g Boden 7,25 mg P/100 g Boden
Umrechnung von P in P_2O_5 (Faktor 2,29) 16,6 mg P_2O_5/100 g Boden

12.4.3 Bewertung
Folgende Grenzzahlen geben einen Anhaltspunkt für den Versorgungszustand eines bestimmten Standortes:

	mg P_2O_5/100 g	mg P/100 g	mg K_2O/100 g	mg K/100 g
arm an Nährstoffen	< 4	< 1,7	< 15	< 12
mittel versorgt	4 – 7	1,7 – 3	15 – 26	12 – 22
gut versorgt	> 7	> 3	> 26	> 22

12.5 Fehler

Abgesehen von analytischen Fehlern, kommt bei der Neubauer-Methode auch die biologische Variation hinzu. Verschiedene Individuen der gleichen Sorte, verschiedene Sorten und besonders verschiedene Pflanzenarten haben ein unterschiedliches Nährstoffaneignungsvermögen. Die Menge an pflanzenverfügbaren Nährstoffen hängt zudem am Standort von weiteren Faktoren, wie zum Beispiel der Intensität der Durchwurzelung und dem Witterungsverlauf ab.

12.6 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz:	Datum:

Herkunft der Bodenprobe: ……………………………………………
(Beschreibung siehe Protokoll 8.5)

Messwerte:
a) Bodeneinwaage: .... g / Gefäß;
b) Gießgewicht (H_2O + Tara + Quarz + Boden): .... g / Gefäß
c) Erntemenge: Brutto (inkl. Tara Tüte) .... g TM / Gefäß
d) Tara Tüte: .... g / Tüte
e) für den Aufschluss eingewogen: .... g TM
f) P-Konzentration der verdünnten Analysenlösung: .... mg P / Liter
(Extinktion x Eichfaktor)
g) Verdünnungsfaktor für die P-Messung ....
h) K-Konzentration der verdünnten Analysenlösung: .... mg K / Liter
i) Verdünngungsfaktor für die K-Messung ....

Rechnung:

P-Konzentration in der Analysenlösung:

Konzentration in der verdünnten Lsg. x Verdünnungsfaktor .... mg P / Liter

P-Menge in der Analysenlösung:

Konzentration in Analysenlsg. x Volumen der Lsg. (50 ml = 0,05 l) .... mg P

P-Konzentration in der Pflanzentrockenmasse:

P-Menge in der Analysenlösung (mg) / TM-Einwaage (g) .... / ....

= .... **mg P / g TM**

P-Menge im Pflanzenaufwuchs:

P-Konzentration (mg P/g TM) x TM-Ertrag (g) = ... mg P /Gefäß

P-Menge im Kontrollgefäß gemessen (gleicher Rechenweg wie oben!): = ... mg P /Gefäß

P-Menge aus dem Boden (Differenz bilden = Netto-Wert!) = ... mg P /Gefäß

Umrechnen je 100 g Boden: / Bodeneinwaage (g) x 100

Pflanzenverfügbare P-Menge aus 100 g Boden .... **mg P/100 g Boden**

Versorgungsgrad des Bodens für P: ....

K-Konzentration in der Analysenlösung:

Konzentration in der verdünnten Lsg x Verdünnungsfaktor .... mg K / ml

K-Menge in der Analysenlösung:

Konzentration in Analysenlsg. x Volumen der Lsg. (50 ml = 0,05 l) .... mg K

K-Konzentration in der Pflanzentrockenmasse:

K-Menge in der Analysenlösung (mg) / TM-Einwaage (g) .... / ....

= .... **mg K / g TM**

K-Menge im Pflanzenaufwuchs:

K-Konzentration (mg K/g TM) x TM-Ertrag (g) = ... mg K /Gefäß

K-Menge im Kontrollgefäß gemessen (gleicher Rechenweg wie oben!): = ... mg K /Gefäß

K-Menge aus dem Boden (Differenz bilden = Netto-Wert!) = ... mg K /Gefäß

Umrechnen je 100 g Boden: / Bodeneinwaage (g) x 100

Pflanzenverfügbare K-Menge aus 100 g Boden .... **mg K/100 g Boden**

Versorgungsgrad des Bodens für K: ....

Kalium: Zusammenstellung für jeweils die gesamte Praktikumsgruppe

mg K je 100 g Boden:

Arbeitsplatz	CAL-Methode	Keimpflanzenversuch
1	…………	………………
2	…………	………………
3	…………	………………
4	…………	………………
5	…………	………………
6	…………	………………
7	…………	………………
8	…………	………………
9	…………	………………
10	…………	………………
11	…………	………………
12	…………	………………
13	…………	………………
14	…………	………………
15	…………	………………
16	…………	………………

Tragen Sie die einzelnen Messwerte Ihrer Praktikumsgruppe in die Grafik ein! Wählen Sie dafür eine den Daten angemessene Skaleneinteilung!

Wie lautet die Regressionsgleichung y = a + bx?
Y = Kalium im Aufwuchs der Keimpflanzen,
X = CAL-extrahierbares Kalium im Boden

a = ………

b = ………

Bestimmtheitsmaß: …..

Interpretation der Messergebnisse (Was bedeuten die Messwerte für den Düngebedarf und die Versorgung der Pflanzen mit K?):

Phosphor: Zusammenstellung für jeweils die gesamte Praktikumsgruppe

mg P je 100 g Boden:

Arbeitsplatz	CAL-Methode	Keimpflanzenversuch
1	…………	………………
2	…………	………………
3	…………	………………
4	…………	………………
5	…………	………………
6	…………	………………
7	…………	………………
8	…………	………………
9	…………	………………
10	…………	………………
11	…………	………………
12	…………	………………
13	…………	………………
14	…………	………………
15	…………	………………
16	…………	………………

Phosphor-Aufnahme der Pflanzen (mg P / 100 g Boden)

CAL-extrahierbarer Phosphor (mg P / 100 g Boden)

Tragen Sie die einzelnen Messwerte Ihrer Praktikumsgruppe in die Grafik ein! Wählen Sie dafür eine den Daten angemessene Skaleneinteilung!

Wie lautet die Regressionsgleichung $y = a + bx$?
y = Phosphor im Aufwuchs der Keimlinge,
x = CAL-extrahierbarer Phosphor im Boden

a = ………

b = ………

Bestimmtheitsmaß: …..

Interpretation der Messergebnisse (Was bedeuten die Messwerte für den Düngebedarf und die Versorgung der Pflanzen mit P?):

13 Carbonatbestimmung nach SCHEIBLER

13.1 Einleitung

Für sehr tonreiche Böden ist der Carbonatgehalt ein Qualitätsmerkmal. Er sollte ca. 1 % betragen. Bei einigen Verfahren zur Bestimmung der organischen Substanz ist es außerdem wichtig, den Carbonatgehalt zu wissen. Das Prinzip der Carbonatbestimmung beruht darauf, dass durch Zugabe einer starken Säure (4 n HCl) das vorhandene Carbonat in Kohlendioxid, Wasser und $CaCl_2$ umgesetzt wird:

$$CaCO_3 + 2\,HCl \rightarrow H_2O + CaCl_2 + CO_2\uparrow$$

Die freigesetzte Menge an CO_2 kann dann volumetrisch, titrimetrisch, gravimetrisch oder kolorimetrisch bestimmt werden. Im Praktikum erfolgt die Bestimmung volumetrisch mit der Scheiblerapparatur der Fa. Eijkelkamp, mit der 5 Proben gleichzeitig gemessen werden können. Die Anwendung ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn bei einer so genannten „Vorprobe“ durch das Übergießen mit HCl ein deutlich sichtbares Aufschäumen des Bodens eintritt.

13.2 Arbeitsanweisung

Vorprobe

Eine kleine Menge Boden wird in einen Prozellantiegel gegeben und mit einigen Tropfen 8 %iger HCl benetzt. Anhand der Blasenbildung kann beurteilt werden, ob überhaupt Carbonat im Boden vorhanden ist. Bei nur schwacher Blasenbildung sollte die Einwaage für die quantitative Bestimmung mittels Scheiblerapparatur verdoppelt werden, bei sehr heftigem Aufschäumen dagegen reduziert.

Die Bodenkundliche Kartieranleitung liefert für die CO_2-Entwicklung folgende Einteilung:

Wirkung der HCl-Behandlung	Bezeichnung	Ungefährer Carbonatgehalt
Mit Sicherheit keine Reaktion	carbonatfrei	0
Reaktion nur hörbar	sehr carbonatarm	< 0,5 %
Reaktion kaum sichtbar	carbonatarm	0,5 bis 2 %
nicht anhaltendes Aufbrausen	carbonathaltig	2,0 bis 10 %
starkes anhaltendes Schäumen	carbonatreich	> 10 %

13.2.1 Messung mit der Scheiblerapparatur (Abbildung auf der nächsten Seite)

- Einwaage der Bodenprobe in das Reaktionsgefäß (mit Schiffchen, je nach Vorprobe bzw. pH-Wert 1 bis 5 g), den genauen Wert im Protokoll notieren!
- Bodenprobe mit 20 ml H_2O befeuchten (Messzylinder verwenden)
- Zweiwegehahn auf Entlüften stellen
- 7 ml 4 n HCl in Reagenzgläschen einfüllen (Dispensette, Schutzbrille!)
- Reagenzgläschen mit einer Pinzette in das Reaktionsgefäß legen, und zwar so, dass die HCl nicht mit dem Boden in Kontakt kommt
- Reaktionsgefäß mit Silikonstopfen verschließen
- Puffergefäß des Calcimeters in der Höhe so verschieben, dass der Flüssigkeitsstand in der Bürette mindestens 3 ml anzeigt
- Zweiwegehahn auf „measuring“ stellen
- Reaktionsgefäß kippen, so dass die HCl aus dem Reagenzgläschen auf die Bodenprobe im Reaktionsgefäß läuft. Mehrmals umschwenken, um die HCl zu verteilen und die Reaktion zu beschleunigen
- Nachführen des Puffergefäßes am Calcimeter, so dass der Flüssigkeitsstand in der Bürette möglichst nicht mehr als 3 cm von dem im Puffergefäß abweicht. Bei höherer Druckdifferenz könnte sich CO_2 in der Sperrflüssigkeit lösen und ein geringeres Volumen an gebildetem CO_2 vortäuschen.
- Wenn sich der Flüssigkeitsstand in der Bürette 5 Minuten lang nicht mehr ändert, den Wert notieren. Wenn sich der Flüssigkeitsstand nicht stabilisiert, das Reaktionsgefäß weiter schwenken (maximal 1 Stunde) bis das Gasvolumen nicht mehr weiter zunimmt, Wert notieren.

13.2.2 Vorbereitungen für die Messung mit dem Calcimeter

- Sperrflüssigkeit in die Büretten einfüllen (20 g KCl je Liter).
- Für CO_2-Sättigung der Sperrflüssigkeit sorgen, z.B. durch den Aufschluss von 0,2 g Calcit.
- Blindwert mit Flüssigkeitsstand bei 20 ml messen
- Kalibrierung mit Calcit durchführen: 0,2 g. Die Einwaagen auf mg genau notieren und das daraus gebildete CO_2-Volumen auf ml genau aufschreiben.
- Ablesen des aktuellen Luftdrucks und der Temperatur im Labor.

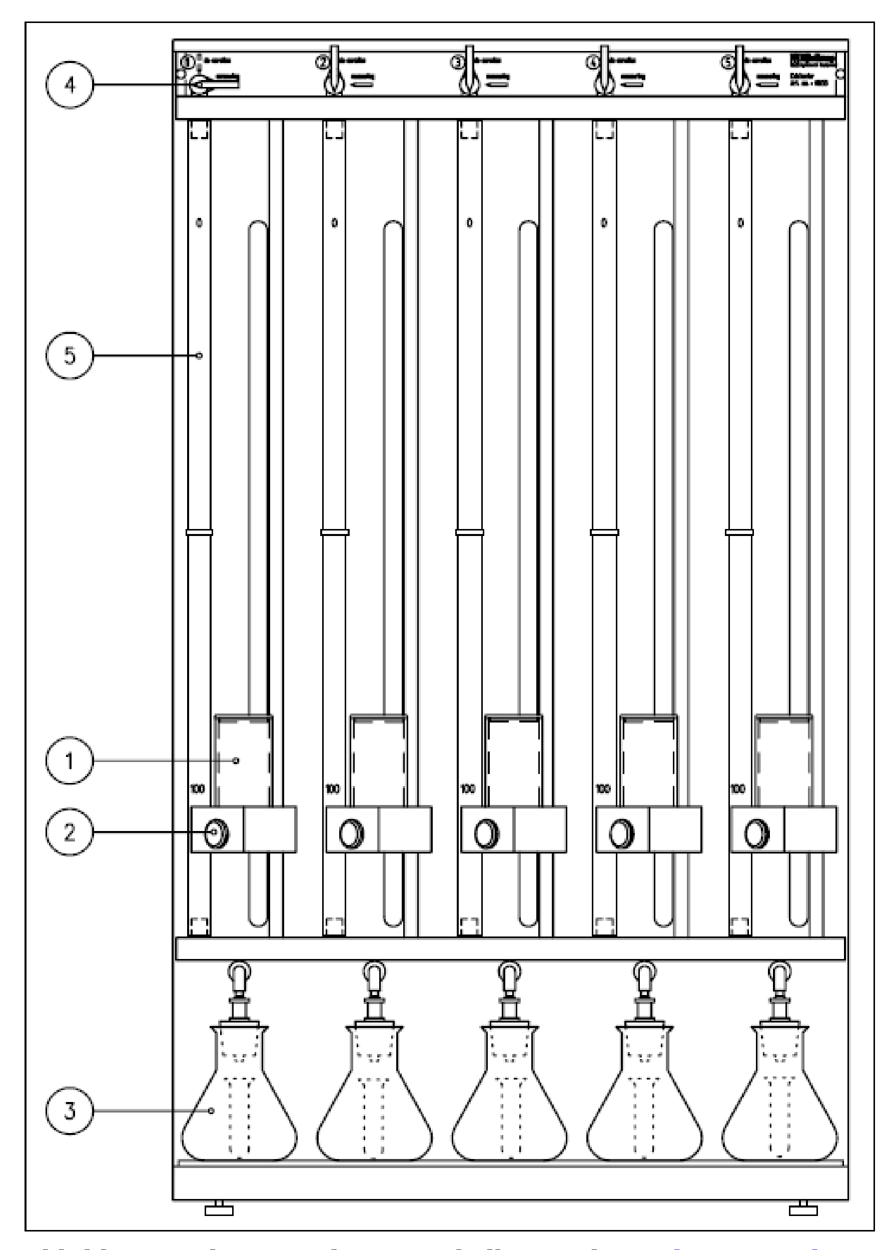


Abbildung: Calcimeter der Fa. Eijkelkamp, die Bedienungsanleitung steht im Downloadbereich der FH-Homepage zur Verfügung und liefert weitere detaillierte Hinweise zur Methode

1 Puffergefäße, können nach oben und nach unten bewegt werden, indem man den Pufferhalter festhält und mit dem Daumen den schwarzen Knopf (2) drückt.
2 Feststellknopf zum Verriegeln des Puffergefäßes
3 Reaktionsgefäße, hier wird der Boden mit HCl in Verbindung gebracht
4 Zweiwegehahn, nach oben gedreht = Entlüftung, horizontal gedreht = Verbindung von Reaktionsgefäß und Bürette
5 Bürette, mit Sperrflüssigkeit

13.3 Berechnung und Darstellung

Die freigesetzte CO_2-Menge wird in $CaCO_3$-Äquivalente umgerechnet und in % der festen Bodenmasse angegeben. Die Berechnung kann auf prinzipiell zweierlei Arten erfolgt: a) Kalibrierung anhand eines Standards (CO_2-Bildung von Calcit-Proben) und b) Umrechnung des Gasvolumens aufgrund des herrschenden Luftdrucks und der Temperatur.

13.3.1 Kalibrierung mit Standard (Abbildung unten).
Wenn $\Delta V_{Probe} < \Delta V_{Std_1}$, dann:

$$Calcit_{Probe} = (\Delta V_{Probe} - \Delta V_{Blindwert}) \cdot \frac{Calcit_{Std_1}}{\Delta V_{Std_1} - \Delta V_{Blindwert}}$$

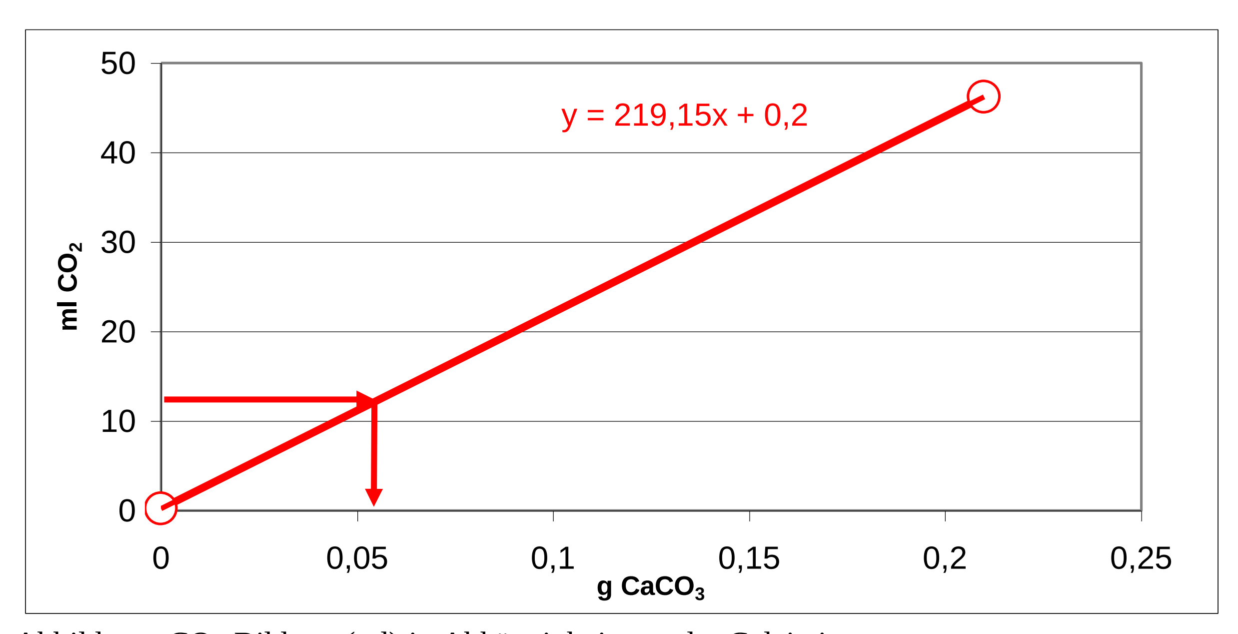


Abbildung: CO_2-Bildung (ml) in Abhängigkeit von der Calciteinwaage

Für die Umrechnung in % der Bodentrockenmasse:

$$Carbonatgehalt\ in\ \%\ CaCO_3\text{-}Äquivalente = \frac{Calcit_{Probe}(mg)}{Bodeneinwaage(mg)} \cdot 100$$

13.3.2 Umrechnung des Gasvolumens

Die freigesetzte CO_2-Menge wird in $CaCO_3$ umgerechnet und in % der festen Bodenmasse angegeben. Unter Normalbedingungen (273 K = 0°C, 1 bar) beträgt die spezifische Dichte des Kohlendioxyd δ_{CO2} = 1,963 kg m^{-3} = mg ml^{-1} (22,414 Liter je mol). Die Messung im Praktikum erfolgte allerdings nicht unter Normalbedingungen. Um die Kenntnis der spezifischen Dichte von CO_2 zu nutzen, müssen wir deshalb mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung berechnen, welches Volumen ΔV_n das freigesetzte CO_2 unter Normalbedingungen eingenommen hätte:

$$\Delta V \cdot \frac{P}{T} = \text{konstant} = \Delta V_n \cdot \frac{1\,\text{bar}}{273°\text{K}}$$

$$\Delta V \cdot \frac{P}{T} \cdot \frac{273°\text{K}}{1000\,\text{mbar}} = \Delta V_n$$

Die während der Messung herrschenden Bedingungen für Druck und Temperatur werden in der Gleichung mit *T* und *P* bezeichnet, das unter diesen Bedingungen von dem freigesetzten CO_2 ein-

genommene Volumen wird durch ΔV symbolisiert. Der Umrechnungsfaktor von CO_2 in $CaCO_3$ ist gleich dem inversen Molmassenverhältnis, also 100/44 = 2,273. Damit ergibt sich folgende Formel für den Carbonatgehalt:

$$\text{Carbonatgehalt in \%} = \frac{\Delta V_n}{Bodeneinwaage[mg]} \cdot \delta_{CO_2} \cdot \frac{Molmasse\,CaCO_3}{Molmasse\,CO_2} \cdot 100$$

$$\text{Carbonatgehalt in \%} = \frac{\Delta V_n}{Bodeneinwaage[mg]} \cdot 1{,}963 \cdot 2{,}273 \cdot 100$$

13.4 Fehler

Die Abschätzung des Carbonatgehaltes aufgrund der Wirkung nach HCl-Behandlung (Vorprobe) ist in der Regel nur nach reichlicher Erfahrung möglich, denn die Intensität der CO_2-Entwicklung wird nicht nur durch die Höhe des Carbonatgehaltes bestimmt. Sie ist auch abhängig von der Bodenart (in nicht bindigen Böden stärkere Reaktion), vom Wassergehalt der Probe und der Temperatur, von der Carbonatverteilung im Boden und der Art der Carbonatverbindung. Bei Auftreten von Kalkkörnern aus der Düngung wird der Carbonatgehalt oft überschätzt. Calcit bedingt eine schnelle CO_2-Entwicklung, Dolomit nur ein langsames, nicht hörbares Aufquellen.
Bei der Scheiblerapparatur ist vor allem darauf zu achten, dass das Gerät dicht ist (prüfen!) und dass nicht vorzeitig Bodenmaterial mit dem HCl in Berührung kommt. Außerdem ist von Bedeutung, dass alle beteiligten Komponenten (HCl, Sperrflüssigkeit, Luft und Bodenprobe) die gleiche Temperatur haben.

13.5 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.:	Datum:

Herkunft der Bodenprobe: ……………………………………………
(Beschreibung siehe Protokoll 8.5)

Vorprobe:
Wirkung des HCl: ....

Bezeichnung nach Kartieranleitung: ....

Ungefährer Carbonatgehalt: .... %

Bodeneinwaage: .... g	Bedingungen bei der Messung:	Druck (P) .... mbar Temperatur (T) .... °C .... °K		
Kalibrierung	Calcit (mg)	Δ V (ml)	netto (ml):	Faktor: mg / ml
Blindwert	...0....	....		
Blindwert	...0....	....		
Standard 1	....	....	....	....
Standard 2	....	....	....	....
Standard 3	....	....	....	....
Eichfaktor	....	....		....

Messung:	Uhrzeit (hh:mm:ss)	Volumen (ml):
Start	....	....
nach 10 min		....
nach 15 min		....
Ende	....	....
Ende - Anfang	**Δ t (min:sek)**	**Δ V (ml)** .... brutto
abzüglich Blindwert		**Δ V (ml)** .... netto

Rechnung:	
a) Anhand von Calcit-Standards $Calcit_{Probe}$ (mg)	**$CaCO_3$-Äquivalente (g) je 100 g Boden =** .... %
b) Anhand von P und T $\Delta V \cdot \frac{P}{T} \cdot \frac{273°K}{1000\,mbar} = \Delta V_n$ = ... ml	**$CaCO_3$-Äquivalente (g) je 100 g Boden** = $\frac{\Delta V_n}{Bodeneinwaage[mg]} \cdot 1{,}963 \cdot 2{,}273 \cdot 100$ = ... %

Interpretation der Messergebnisse:

14 pH-Wert und Kalkbedarf nach VDLUFA

14.1 Einleitung

Der **pH-Wert** kennzeichnet die Konzentration an H^+ in der Bodenlösung. Tatsächlich liegt in wässiger Lösung immer das Hydronium-Ion (H_3O^+) anstelle des Protons vor. Es unterliegt wie die anderen Kationen dem Ionenaustausch. Die Konzentration des H_3O^+ in einer Lösung, die mit einem Austauscher im Gleichgewicht steht, ist deshalb abhängig von der Konzentration und der Zusammensetzung der in der Lösung befindlichen Salze. Aus diesem Grund ist folgendes zu bedenken. Angaben des pH-Wertes im Boden sind nur vergleichbar, wenn die Zusammensetzung und die Konzentration der Salzlösung gleich sind, in der gemessen wurde. Üblich sind 0,01 *M* $CaCl_2$ oder 0,1 *M* KCl. Das Verhältnis von Bodeneinwaage zum Volumen der Lösung ist ebenfalls für das Gleichgewicht an sorbierten und in Lösung befindlichen Ionen relevant. Üblich ist es, 10 g Boden in 25 ml Lösung zu suspendieren. In manchen Fällen wird der pH-Wert auch in wässeriger Suspension bestimmt. Die pH-Werte liegen dann um etwa 0,5 Einheiten höher als bei Messung in einer Neutralsalzlösung. Besonders nachteilig bei der Messung des pH in wässeriger Suspension ist die starke Abhängigkeit des Messwertes vom aktuellen Salzgehalt des Bodens. Bereits sehr geringe Schwankungen (z.B. infolge von Düngung oder Mineralisierung) haben eine große temporäre Wirkung. Im Übrigen kommt die 0,01 *M* $CaCl_2$ der Zusammensetzung und der Konzentration der Bodenlösung unter natürlichen Bedingungen am nächsten. Im Labor wird der pH-Wert schnell und einfach mit einer pH-Elektrode gemessen. Im Freiland werden auch Farbindikatoren eingesetzt. Der pH-Wert sagt allerdings nur etwas über den aktuellen Zustand des Bodens aus, nicht aber darüber, welcher Aufwand erforderlich ist, um den pH-Wert durch Kalkung zu verändern.
Der **Kalkbedarf** richtet sich grundsätzlich nach der titrierbaren Acidität (H-Wert) zur Erreichung des angestrebten pH-Wertes. Die Messung ist allerdings etwas aufwendig. Für praktische Belange, um den Kalk-Düngebedarf abzuschätzen, war bisher in Westdeutschland die Methode nach SCHACHTSCHABEL üblich. Die Methode basiert darauf, dass zwischen der titrierbaren Acidität des Bodens und dem in einer gepufferten Salzlösung gemessenen Boden-pH eine enge (nicht lineare) Beziehung besteht. In Ostdeutschland ist seit langem eine andere Vorgehensweise üblich, die sich inzwischen in ganz Deutschland etabliert. Der Kalkbedarf wird demnach in Abhängigkeit vom Humusgehalt, der Bodenart, der Nutzungsform und dem in 0,01 *M* $CaCl_2$ gemessenen pH-Wert aus empirischen Daten geschätzt. Basis dieser - im Unterschied zur SCHACHTSCHABEL-Methode – empirischen Methode sind zahlreiche in Ostdeutschland durchgeführte Feldversuche.

14.2 Prinzip der Methode

Für die Abschätzung des Kalkbedarfs wird der pH-Wert in einer Suspension von Boden und 0,01 *M* $CaCl_2$-Lösung im Verhältnis 1 + 2,5 in Mineralböden auf der Basis (Masse (g) + Volumen (ml) bzw. in Moorböden (Volumen + Volumen), gemessen. Dann wird der Kalkbedarf aus einer Tabelle oder mit Hilfe einer Regressionsgleichung ermittelt. Die Tabellenwerte bzw. die Regressiongleichung spiegeln den Zusammenhang zwischen Kulturpflanzenertrag und pH-Wert wider. Die Beziehung zwischen pH-Wert und Ertrag ist abhängig vom Humusgehalt des Bodens und der Textur.

14.3 Durchführung

14.3.1 Geräte und Lösungen

Glaselektrode, 100 ml Erlenmeyer-Kolben, Reagenzglas (ca. 40 ml), 0,01 *M* $CaCl_2$

14.3.2 Arbeitsanweisung

- Bodeneinwaage: 10,0 g lufttrockener Boden in einen 100 ml Erlenmeyer-Kolben.
- Zugabe von 25ml der $CaCl_2$-Lösung.
- Gleichgewicht zwischen Lösung und Boden einstellen lassen (ca. 1 Stunde, dabei gelegentlich umrühren)
- Messung des pH-Wertes in der Suspension bzw. dem dekantierten Überstand.

- Ablesen des Kalkbedarfs aus den entsprechenden Tabellen der VDLUFA-Methodenbeschreibung. Hierfür muss die Nutzungsform (Grünland oder Ackerland) der Humusgehalt und die Bodenartengruppe bekannt sein. Für die Bodenartengruppen gilt dabei folgende Zuordnung:

Bodenartengruppe	Bezeichnung	Tongehalt %	Ton- plus Feinschluffgehalt %
1	Sand	bis 5	bis 7
2	schwach lehmiger Sand	> 5 bis 12	> 7 bis 16
3	stark lehmiger Sand	> 12 bis 17	> 16 bis 23
4	sandiger/schluffiger Lehm	> 17 bis 25	> 23 bis 35
5	schwach toniger Lehm bis Ton	> 25	> 35
6	Moorböden (> 30 % Humus)	-	-

- Für Mineralböden mit niedrigem oder sehr niedrigem pH-Wert (pH-Klassen A und B) kann der Kalkbedarf (KB) auch nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$KB \text{ [dt CaO/ha]} = a + b \cdot \text{pH}$$

Die Parameter a und b stammen aus Regressionsgleichungen, deren Werte für Ackerland bzw. für Grünland der jeweiligen untenstehenden Tabelle entnommen werden können.
Beispiel:
Ackerboden, Bodenartgruppe 3, Humusgehalt < 4,0 %, pH-Wert 5,3.
Durch Einsetzen der Werte für a und b in die Gleichung errechnet sich der Kalkbedarf in dt CaO/ha.

$$KB = 303{,}0 + (-48{,}0 \cdot 5{,}3) = 48{,}6 \text{ [dt CaO/ha]}$$

Der untersuchte Boden hat einen Kalkbedarf von 49 dt CaO/ha.

Konstante a und Faktor b zur Berechnung des Kalkbedarfes für Ackerland

Bodenartengruppe	Humusgehalt %	*a*	*b*	gültig für pH-Bereich
1	bis 4,0	161,2	-29,1	4,0 bis 5,3
1	4,1 bis 8,0	185,7	-36,7	3,7 bis 4,9
1	8,0 bis 15,0	178,8	-37,8	3,4 bis 4,6
1	15,0 bis 30,0	67,0	-15,0	3,1 bis 4,2
2	bis 4,0	230,9	-38,6	4,0 bis 5,7
2	4,1 bis 8,0	248,5	-45,0	3,7 bis 5,3
2	8,0 bis 15,0	236,2	-46,4	3,3 bis 4,9
2	15,0 bis 30,0	82,7	-17,3	3,0 bis 4,5
3	bis 4,0	303,0	-48,0	4,5 bis 6,0
3	4,1 bis 8,0	333,8	-58,3	4,2 bis 5,5
3	8,0 bis 15,0	321,2	-60,8	3,8 bis 5,1
3	15,0 bis 30,0	95,7	-19,1	3,3 bis 4,7
4	bis 4,0	378,4	-58,1	4,5 bis 6,2
4	4,1 bis 8,0	393,1	-66,2	4,2 bis 5,7
4	8,0 bis 15,0	349,7	-63,2	3,8 bis 5,3
4	15,0 bis 30,0	105,0	-20,0	3,3 bis 4,9
5	bis 4,0	505,3	-76,9	4,5 bis 6,3
5	4,1 bis 8,0	447,3	-73,8	4,2 bis 5,8
5	8,0 bis 15,0	368,0	-65,0	3,8 bis 5,4
5	15,0 bis 30,0	112,2	-20,8	3,3 bis 5,0

Konstante a und Faktor b zur Berechnung des Kalkbedarfes für Grünland

Bodenartengruppe	Humusgehalt %	*a*	*b*	gültig für pH-Bereich
1	bis 15,0	108,5	-22,5	3,5 bis 4,6
1	15,1 bis 30,0	60,0	-13,3	3,1 bis 4,2
2	bis 15,0	138,6	-26,0	3,8 bis 5,1
2	15,1 bis 30,0	76,0	-16,0	3,2 bis 4,5
3	bis 15,0	181,9	-33,0	4,0 bis 5,3
3	15,1 bis 30,0	94,3	-19,0	3,4 bis 4,7
4	bis 15,0	217,0	-38,0	4,2 bis 5,5
4	15,1 bis 30,0	118,7	-23,0	3,6 bis 4,9
5	bis 15,0	243,2	-41,8	4,2 bis 5,6
5	15,1 bis 30,0	143,4	-27,3	3,6 bis 5,0

14.4 Darstellung und Bewertung

Bei der Angabe des pH-Wertes wird in Klammern das Neutralsalz angegeben, in dem der Wert bestimmt wurde bzw. „H_2O“: Beispiel: pH ($CaCl_2$). Der Kalkbedarf wird meist als Bedarf an CaO (Branntkalk) oder an $CaCO_3$ (Kohlensaurem Kalk) in dt ha^{-1} angegeben.
Welcher pH-Wert als optimal angesehen wird und wann eine Aufkalkung erforderlich ist, hängt von mehreren Umständen ab. Hierzu zählt das Vorhandensein und die Verfügbarkeit von Mikro- und Makronährstoffen sowie toxischer Elemente, der Humusspiegel und der Wunsch, diesen zu erhalten, spielt eine Rolle ebenso wie die beabsichtigte Nutzung. Im Wald werden meist geringere pH-Werte toleriert als im Grünland und dort wiederum geringere als in Ackerböden. Auch die Pflanzenarten unterscheiden sich in ihren pH-Ansprüchen. Der Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) nennt für Ackerböden folgende **pH-Ziele**:

Ton %	**Boden art**	**Acker**				**Grünland**		**Acker und Grünland**
		Humusgehalt %						
		< 4	**4 – 8**	**8 – 15**	**15 – 30**	**< 15**	**15 - 30**	**> 30**
< 5	S	5,4 - 5,8	5,0 - 5,4	4,7 - 5,1	4,3 - 4,7	4,7 - 5,2	4,3 - 4,7	
5 – 12	Sl	5,8 - 6,3	5,4 - 5,9	5,0 - 5,5	4,6 - 5,1	5,2 - 5,7	4,6 - 5,1	
12 – 17	Ls	6,1 - 6,7	5,6 - 6,2	5,2 - 5,8	4,8 - 5,4	5,4 - 6,0	4,8 - 5,4	
17 – 25	L	6,3 - 7,0*	5,8 - 6,5	5,4 - 6,1	5,0 - 5,7	5,6 - 6,3	5,0 - 5,7	
> 25	LT,T	6,4 - 7,2*	5,9 - 6,7	5,5 - 6,3	5,1 - 5,9	5,7 - 6,5	5,1 - 5,9	
Moor								4,3

* günstig, wenn zusätzlich > 1 % freies $CaCO_3$ fein verteilt im Boden als gefügestabilisierende Reserve vorliegt.

14.5 Fehler

Abgesehen von den bereits erwähnten systematischen Abweichungen des pH-Wertes in Abhängigkeit von der verwendeten Salzlösung treten bei der pH-Messung kaum Fehler auf. Es ist lediglich darauf zu achten, dass zwischen der Herstellung der Suspension und der eigentlichen Messung genügend Zeit bleibt, damit sich ein Gleichgewicht einstellen kann.
Außerhalb des Labors werden häufig Indikatorpapiere oder –stäbchen verwendet. Hierbei ist vor allem darauf zu achten, dass die Indikatoren für den zu messenden pH-Bereich verwendet werden und die Reaktionszeit eingehalten wird. Besonders tonhaltige Böden können einen farbigen Niederschlag auf der Indikatoroberfläche erzeugen, der die Farbbeurteilung beeinträchtigt.

14.6 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.:	Datum:

Herkunft der Bodenprobe: ……………………………………………
(Beschreibung siehe Protokoll 8.5)

pH-Werte:	
pH-Wert der Lösung (für alle gleich)	....
pH-Wert der Suspension	....
Kalkbedarf nach VDLUFA:	
Nutzungsform	....
Bodenartengruppe	....
Konstante *a*	....
Faktor *b*	....
angestrebter pH-Wert nach VDLUFA	....
Kalkbedarf	.... dt CaO je ha

Interpretation der Messergebnisse:

15 Ammoniumstickstoff in der Gülle mittels Quantofix®

15.1 Einleitung

Der Stickstoff in Wirtschaftsdüngern (Gülle, Stallmist) und in den meisten Sekundärrohstoffdüngern (z.B. Klärschlamm) liegt zum Teil als Ammonium und zum Teil in organischer Bindung vor. Nur der Stickstoff im Ammonium ist unmittelbar verfügbar für die Pflanzen und die nitrifizierenden Bakterien im Boden. Der Wassergehalt flüssiger Dünger kann sehr unterschiedlich sein und dementsprechend auch die Menge an N, die mit dem Wirtschaftsdünger ausgebracht wird. Die in flüssigen Düngern enthaltene N-Menge kann abgeschätzt werden, indem man den Ammonium-N bestimmt. Dies kann auf einfache Weise mit einem Quantofix-Gerät geschehen. Das Verhältnis von organischem N zum Ammonium-N

15.2 Probenahme

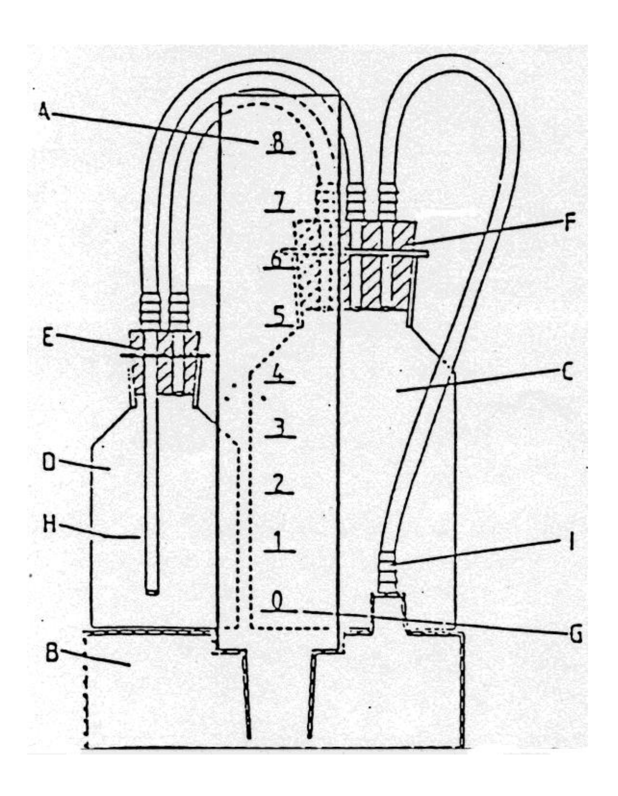
Bei der Probennahme ist es wichtig, darauf zu achten, dass die zu untersuchende Probe repräsentativ ist für die Gülle oder den Klärschlamm im Lagerbehälter. Vor der Probennahme muss daher der Behälterinhalt gründlich aufgerührt werden. Unmittelbar nach dem Mischen werden mit einem an einer Stange befestigten Becher 4 bis 6 Proben an jeweils verschiedenen Stellen des ,Behälters entnommen und in einen Eimer zu einer Mischprobe vereinigt. Dies Mischprobe wird dann wiederum sorgfältig umgerührt und daraus dann die für die Untersuchung benötigte Probenmenge entnommen.

15.3 Prinzip der Methode

Das Prinzip der Ammonium-Bestimmung mit dem Quantofix-Gerät beruht darauf, dass das in der Gülle oder dem Klärschlamm befindliche Ammonium durch Zugabe eines Oxidationsmittels (5 Teile NaOCl 12%ig + 1 Teil NaOH 30%ig) zu gasförmigem Luftstickstoff (N_2) oxidiert wird. Das so entstandene Gas verdrängt eine Wassermenge entsprechenden Volumens aus dem Volumetersockel in den Messzylinder. Der Gehalt der Probe an Ammoniumstickstoff kann dann an der geeichten Skala des Messzylinders anhand des Wasserniveaus direkt in kg NH_4-N/m^3 abgelesen werden.

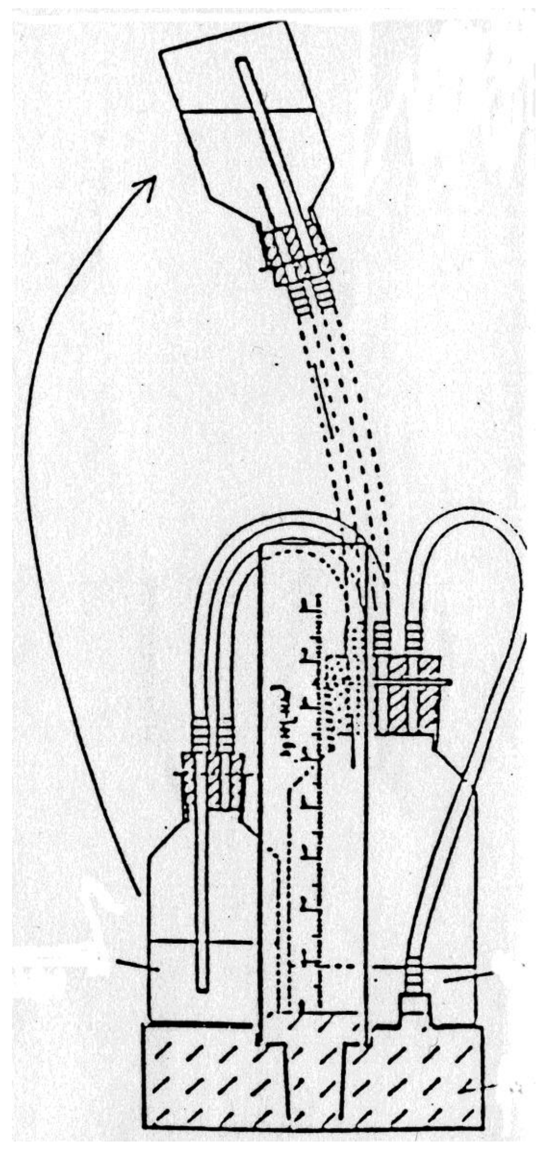
15.4 Durchführung

A. Volumeter (Messzylinder)
B. Volumetersockel
C. Reaktionsgefäß
D. Reaktionsmittelbehälter
E. Stopfen für Reaktionsmittelbehälter
F. Stopfen für Reaktionsgefäß
G. Nullmarkierung des Messzylinders
H. Einfüllmarkierung für Reaktionsmittel
I. Schlauchtülle



Vorbereitung des Gerätes:
Den Stopfen (E und F) lösen und in den Messzylinder (A) langsam Wasser einfüllen bis der Wasserspiegel mit der Nullmarkierung (G) auf der Skala des Messzylinders (A) übereinstimmt. Durch wechselseitiges Anheben (Kippen) des Volumetersockels (B) eventuell noch vorhandene Luftblasen aus dem Innern des Sockels entweichen lassen, gegebenenfalls Wasser nachfüllen.

Durchführung und Messung:



- Mit dem Messbecher 100 ml Gülle in das Reaktionsgefäß (C) geben, den Becher zum Nachspülen zweimal mit Wasser füllen und dieses ebenfalls in das Reaktionsgefäß geben. Das Reaktionsgefäß mit Stopfen (F) dicht verschließen.
- In den Reaktionsmittelbehälter (D) bis zur Markierung (H) das Reaktionsmittel einfüllen. Anschließend den Behälter (D) mit Stopfen (E) verschließen, anheben und so über das Reaktionsgefäß (C) halten, dass das gesamte Reaktionsmittel in das Reaktionsgefäss überfließt (Bild 2). Den Reaktionsmittelbehälter wieder in der Haltevorrichtung abstellen. Nach etwa 5 Minuten das Reaktionsgefäss leicht anheben und kurze Zeit vorsichtig schwenken.
- Nach weiteren 2 Minuten kann der Ammoiumstickstoffgehalt der Gülle auf der Skala in Höhe des Wasserspiegels in kg NH_4-N/m^3 abgelesen werden.

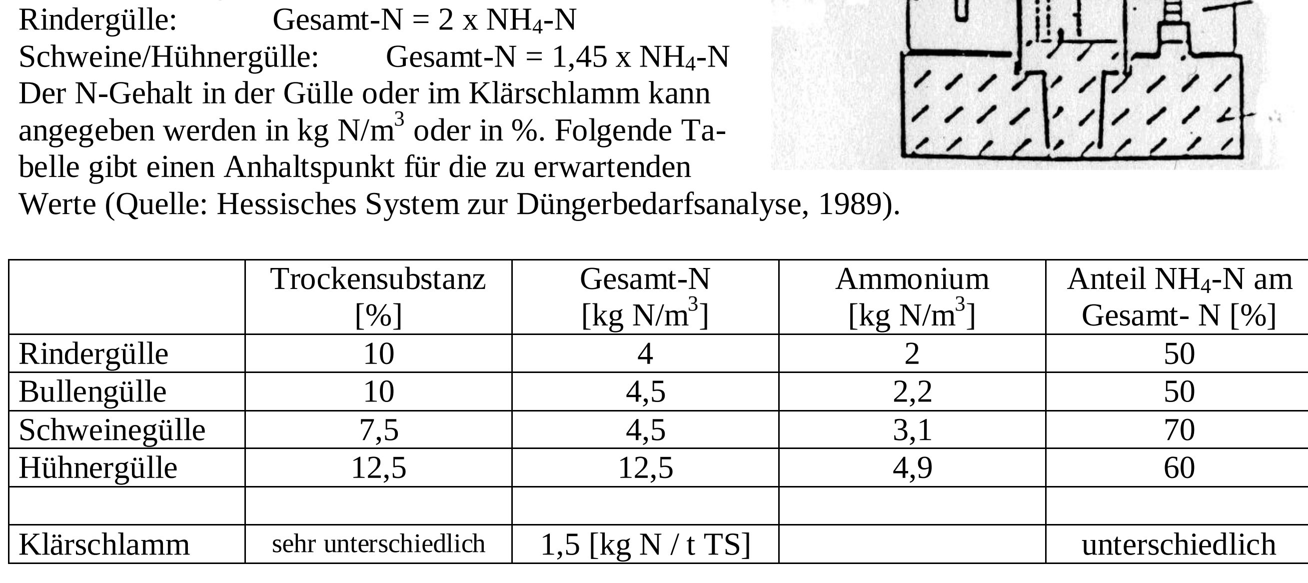
15.5 Darstellung und Bewertung

Der Stickstoff in der Rindergülle besteht meistens zu etwa 40 bis 60 % aus Ammonium-N. Bei Schweine- und Hühnergülle nimmt man an, dass etwa 2/3 des Stickstoff in Form von Ammonium in der Gülle vorliegt. Aufgrund dieser Annahmen lässt sich der Gesamt-N in den Wirtschaftsdüngern abschätzen:

Rindergülle: Gesamt-N = 2 x NH_4-N

Schweine/Hühnergülle: Gesamt-N = 1,45 x NH_4-N

Der N-Gehalt in der Gülle oder im Klärschlamm kann angegeben werden in kg N/m^3 oder in %. Folgende Tabelle gibt einen Anhaltspunkt für die zu erwartenden Werte (Quelle: Hessisches System zur Düngerbedarfsanalyse, 1989).



	Trockensubstanz [%]	Gesamt-N [kg N/m^3]	Ammonium [kg N/m^3]	Anteil NH_4-N am Gesamt- N [%]
Rindergülle	10	4	2	50
Bullengülle	10	4,5	2,2	50
Schweinegülle	7,5	4,5	3,1	70
Hühnergülle	12,5	12,5	4,9	60
Klärschlamm	sehr unterschiedlich	1,5 [kg N / t TS]		unterschiedlich

15.6 Protokoll

Name:	Gruppe:	Arbeitsplatz-Nr.	Datum:

Art der Probe: (Herkunft, Tierbestand, Trockensubstanzanteil geschätzt, Homogenisierung vor der Entnahme)

Messergebniss:
kg NH_4-N/m^3: ....
kg Gesamt-N/m^3: ....

Interpretation der Messergebnisse:

16 Gesamtkohlenstoff (C_t) im Boden mittels Elementaranalyse

16.1 Einleitung

Die Bestimmung der organischen Substanz im Boden kann direkt über den Glühverlust oder indirekt über die Messung des C-Gehaltes erfolgen. Beim Glühverlust wird die Bodenprobe auf 550 °C erhitzt. Problematisch ist die Methode wegen des im Boden vorhandenen Restwassers. Bei den indirekten Methoden wird statt der organischen Substanz der Kohlenstoff bestimmt und über den geschätzten C-Anteil[11] die Masse der organischen Substanz berechnet. Die Methoden unterscheiden nicht zwischen Wurzeln, Bodenorganismen und postmortaler organischer Substanz (= Humus). Seit einigen Jahren wird der Kohlenstoff im Boden mittels Elementaranalysator bestimmt. Komplikationen ergeben sich dabei durch die thermische Zerstörung der Carbonate.
Das Prinzip der Methode beruht darauf, dass eine Bodenprobe in einem Ofen einer sehr hohen Temperatur ausgesetzt wird. Kohlenstoffhaltige Verbindungen werden dadurch zu CO_2 oxidiert. Das freigesetzte CO_2 wird gaschromatografisch oder über Wärmeleitfähigkeitsdetektoren in einem C-freien Trägergas (z.B. Helium) analysiert. Bei niedrigen Ofentemperaturen (< 700 °C) wird nur organischer Kohlenstoff erfasst. Bei höheren Temperaturen (z.B. 1100 °C) wird auch anorganischer Kohlenstoff aus den Carbonaten als CO_2 freigesetzt und gemessen. Das im Praktikum eingesetzte Gerät VarioMax der Fa. Elementar arbeitet mit dieser hohen Ofentemperatur. Der Vorteil der hohen Temperatur liegt darin, dass gleichzeitig auch der Stickstoff in der Probe gemessen werden kann. Bei niedrigerer Ofentemperatur ist das nicht möglich. Der Nachteil der hohen Ofentemperatur besteht darin, dass für die Bestimmung des Humusgehaltes zusätzlich noch der Carbonatgehalt der Bodenprobe bestimmt werden muss. Calciumcarbonat besteht zu 12% aus Kohlenstoff. Der organische Kohlenstoff berechnet sich dann nach der Formel:

$$Corg = C_t - 0{,}12 \times CaCO_3äq$$

In der Gleichung steht Corg für die Konzentration an organischem Kohlenstoff im Boden, Ct für die Konzentration an Gesamtkohlenstoff (C total) und $CaCO_3$äq für die Konzentration der beispielsweise mit der Scheiblermethode gemessenen $CaCO_3$-Äquivalente. Alternativ zu Messung des Carbonats mit der Scheiblermethode messen einige Labore (z.B. die LUFA in Speyer) die Bodenprobe mit dem Elementaranalysator nach einer Vorbehandlung mit 10%iger HCl. Dadurch wird das Carbonat in der Probe zerstört und mit dem Elementaranalysator im Wesentlichen nur noch der organische Kohlenstoff erfasst. Graphit und Kohlereste werden allerdings durch HCl nicht zerstört und auch bei niedriger Ofentemperatur durch die Elementaranalyse erfasst.

16.2 Durchführung

- Einwaage im Wägeraum: Die Bodenproben werden in die bereitgestellten Stahltiegel eingewogen: Einwaage ca. 1 g auf einer Feinwaage, der genaue Wert wird mit mindestens 3 Nachkommastellen im Protokoll notiert.
- Tiegel im Probentablett platzieren: Die Tiegel mit den Proben werden dann jeweils entsprechend der Probennummerierung in dem gelochten Tablett platziert.
- Kalibriersubstanzen einwiegen: Organische Substanz mit bekannter C-Konzentration wird zum Ermitteln des so genannten Tagesfaktors des Elementaranalysators sowie die Kontroll-Proben für die interne Qualitätssicherung werden von der Laborassistentin, Frau Walk, eingewogen.
- Die Tiegel mit den Proben werden dann später von Frau Walk in den Probennehmer des Elementaranalysators überführt. Die eigentliche Analyse erfolgt dann halbautomatisch und wird im Praktikum lediglich vorgeführt.

16.3 Darstellung und Bewertung

Die Menge an organischem Kohlenstoff ergibt sich aus der Differenz der mit dem Elementaranalysator gemessenen C_t-Konzentration und dem aus dem Carbonat stammenden anorganischen C. In vielen neueren Arbeiten wird dieser Corg-Wert unmittelbar angegeben.

---

[11] Umrechnung des C-Gehaltes in den Humusgehalt wird häufig ein C-Anteil im Humus von 58% angenommen (entspricht Faktor 1,72).

Aus Konvention (und leider auch durch überkommene administrative Vorgaben) ist es auch weiterhin üblich, den tatsächlich ermittelten Corg-Wert durch Multiplikation mit einem Faktor in die Konzentration an organischer Substanz umzurechnen. Für den Faktor wird häufig angenommen, dass 58 Gewichts% der organischen Substanz aus Kohlenstoff besteht:

$$\text{Organische Substanz } \% = C_{org} \,\% \,/\, 0{,}58$$

In der Regel wird dann die so errechnete Konzentration an organischer Substanz im Boden mit dem Humusgehalt (= postmortale organische Substanz) gleichgesetzt und in % bzw. g/100 g Boden ausgedrückt.

Die quantitative Bewertung der Humusgehalte ist die gleiche wie für die nasschemisch ermittelten Werte. Die Elementaranalyse bietet durch die gleichzeitige Erfassung der Stickstoffkonzentration in der Bodenprobe darüber hinaus die Möglichkeit, eine Information über die Humusqualität zu erhalten. Eine Kenngröße hierfür ist das C:N-Verhältnis in der organischen Substanz. Stabile, besonders rekalzitrante, hoch molekulare, unlösliche Huminstoffe haben meistens ein engeres C:N-Verhältnis als weniger rekalzitrante Huminstoffe. Das C:N-Verhältnis von stabilem Humus in einem Mineralboden beträgt in der Regel ca. 10 bis 12. Die löslichen Fulvosäuren im Rohhumus haben zum Beispiel ein weiteres C:N-Verhältnis von ca. 12 bis 15. Ein weites C:N-Verhältnis in der organischen Substanz kann aber auch auf leicht abbaubare organische Substanz hinweisen. Das ist dann der Fall, wenn größere Mengen organischer Reste (z.B. Pflanzenrückstände, wenig verrotteter Kompost) in den Boden eingemischt wurden, die noch nicht vollständig zersetzt und humifiziert worden sind.

16.4 Fehler

Bei der Ermittlung des C-Gehaltes mit der Elementaranalyse gibt es gerätetechnische Fehlerquellen und systematische Fehler.

Um gerätetechnische Fehler aufzuspüren und zu minimieren ist zweierlei wichtig:

1. In jeder Messserie sind Standardproben der zu messenden Substanz, z.B. Bodenproben aus Ringversuchen mit bekannten C- und N-Gehalten, mitzunehmen und die aktuellen Messergebnisse mit früheren Ergebnissen zu vergleichen. Treten größere Abweichungen im Verlauf der Serie auf, sind die Fehler zu suchen und die Messung der ganzen Serie zu wiederholen.
2. Von Tag zu Tag (Tagesfaktor), aber auch im Verlauf einer einzelnen Serie kann es zu einer kontinuierlichen Veränderung der Detektionsempfindlichkeit (Messwert-Drift) kommen. Eine Messwertdrift fällt nur dann auf, wenn es Laborparallelen gibt, die aber nicht unmittelbar hintereinander gemessen werden. Hierauf ist bei der Bestückung des Probennehmers zu achten. Anderenfalls wird leicht eine unentdeckte Messwert-Drift als Versuchseffekt interpretiert.

Ein systematischer Fehler bei der Bestimmung des Humusgehaltes mittels Elementaranalyse ist die Erfassung des Carbonat-Kohlenstoffes, wenn hohe Ofentemperaturen zur Anwendung kommen. Auch die Erfassung des Kohlenstoffs aus Graphit, Kohle und Ruß im Boden ist als systematischer Fehler zu werten. Außerdem unterscheidet die Elementaranalyse nicht zwischen lebender und postmortaler organischer Substanz und auch nicht zwischen Huminstoffen und Streu. Die Annahme, dass 58 % der organischen Substanz aus Kohlenstoff besteht, trifft für die Streu nicht zu. Hier ist der C-Anteil oft deutlich geringer. In Anbetracht dieser Fehler erscheint es sinnvoll, die Messergebnisse nicht in % Humus, sondern als Ct bzw. Corg in g/kg Boden auszudrücken.

16.5 Protokoll

Name:	Praktikumsgruppe	Arbeitsplatz-Nr.	Datum:

Interne Qualitätskontrolle:

Probe	Sollwert: % C_t (von bis)	gemessen % C	Sollwert: % N_t (von bis)	gemessen % N	C:N
RA2008 Bd 2	1,637 (1,457 bis 1,828)		0,156 (0,124 bis 0,192)		

Getrockneter Feinboden

Angaben zur Nutzung (Acker, Grünland, Garten, Forst ...)	
Organische Düngung der letzten 3 jahre soweit bekannt	
Besonderheiten (ehemaliger Grünlandumbruch, Anmoor usw.)	
Schicht (cm von bis), aus der die Probe entnommen wurde	
Bodeneinwaage in die Tiegel (ca. 1 g, ± 0,1 g, Wert hier und auf der ausliegenden Liste notieren!)	
Rohwert C_{total} %: .... / Bodeneinwaage (g)	
$CaCO_3$äq % (Werte des Protokolls von Seite 62)	
Carbonat-C (g / 100 g Boden) (= 12 % der $CaCO_3$-äq.)	
Corg % (= C_{total} - 0,12 x $CaCO_3$-äq.)	
Rohwert N_{total} %: .... / Bodeneinwaage (g)	
C:N-Verhältnis = Corg/Nt	
Corg im Boden [mg C/ g Boden]	
Organische Substanz (Humus) % (Corg % / 0,58)	

Interpretation:

re

0 0 1 2 3 4 5 6

Durchlässigkeitsstufen kf

Literatur zum Thema:

1. D.L. Rowell (1997) „Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendung“, Springer, Berlin,

2. Bodenkundliche Kartieranleitung (2005), 5. verbesserte und erweiterte Auflage, AG Boden (Hrsg.), Hannover

3. K. H. Hartge und R. Horn (1992) „Einführung in die Bodenphysik“, 3. Aufl., Enke, Stuttgart

4. K. H. Hartge und R. Horn (2008) „Die physikalische Untersuchung von Böden“, 4. vollständig überarbeitete Auflage, Schweizerbart, Stuttgart 2008

5. E. Schlichting, H.-P. Blume und K. Stahr (1995) „Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler“, Pareys Studientexte 81, 2. neubearbeitete Auflage, Blackwell-Verlag, Berlin

6. R. Kretzschmar (1986) „Kulturtechnisch-Bodenkundliches Praktikum: Ausgewählte Laboratoriumsmethoden – Eine Anleitung zum selbständigen Arbeiten an Böden“ 5. Auflage, Universität Kiel, Sebstverlag

7. K. Schaller (1988) „Praktikum zur Bodenkunde und Pflanzenernährung“, Geisenheimer Berichte Band 2, Geisenheim, Selbstverlag

8. Hoffman, G. (1991 und 1997) „Methodenbuch Band I: Die Untersuchung von Böden“, 4. Aufl., VDLUFA-Verlag, Darmstadt

11. H.-P. Blume et al. (2000) „Handbuch der Bodenuntersuchung“, Wiley-VCH